



**Ministério da Educação**  
**Universidade Federal da Integração Latino-Americana**  
**Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território**  
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura  
Engenharia Civil de Infraestrutura

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES DO LIGANTE ASFÁLTICO 50-70  
MODIFICADO COM CINZA DE RESÍDUOS DE MADEIRA**

ALEKSEY JUNIOR GRANDO

Foz do Iguaçu, PR  
Dezembro de 2019



**Ministério da Educação**  
**Universidade Federal da Integração Latino-Americana**  
**Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território**  
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura  
Engenharia Civil de Infraestrutura

## **ESTUDO DAS PROPRIEDADES DO LIGANTE ASFÁLTICO 50-70 MODIFICADO COM CINZA DE RESÍDUOS DE MADEIRA**

ALEKSEY JUNIOR GRANDO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora do Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura da UNILA, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

**Orientador:** Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Ricardo Oliveira de Souza

Foz do Iguaçu, PR  
Dezembro de 2019

## RESUMO

O presente estudo avaliou as propriedades do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50-70 modificado com cinza proveniente da queima de resíduos de madeira, antes e após o seu envelhecimento. Amostras com diferentes percentuais de cinza (0, 5, 10, 15 e 20%) foram submetidas a ensaios de caracterização física, reológica e de durabilidade. A caracterização física possibilitou avaliar a consistência, a susceptibilidade térmica e a segurança do CAP a partir dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento (anel e bola) e ponto de fulgor (vaso aberto Cleveland). A caracterização reológica foi realizada através do viscosímetro rotacional Brookfield e do reômetro de cisalhamento dinâmico (Dynamic Shear Rheometer, DSR). Os ensaios reológicos permitiram a determinação dos parâmetros de trabalhabilidade e viscoelasticidade (módulo complexo- $G^*$ , ângulo de fase- $\delta$ , quociente  $G^*/\sin\delta$  e produto  $G^*\times\sin\delta$ ). Para realizar a caracterização da durabilidade, as amostras foram envelhecidas na estufa de filme fino rotativo (Rolling Thin-Film Oven Test, RTFOT), simulando o envelhecimento de curto prazo. As amostras também foram envelhecidas no vaso de envelhecimento sob pressão (Pressure Aging Vessel, PAV), para simular o envelhecimento de longo prazo. Os resultados indicam um ganho de consistência, maior resistência à deformação permanente e melhor resistência à variação de temperatura do CAP modificado.

**Palavras-chave:** Pavimentação asfáltica; Modificação de ligantes asfálticos; Reaproveitamento de resíduos; Cinza de resíduos de madeira.

## ABSTRACT

The present study evaluated the properties of 50-70 asphalt binder modified with ash from burning wood residues, before and after aging. Samples with different ash percentages (0, 5, 10, 15 and 20%) were submitted to physical, rheological and durability characterization tests. The physical characterization allowed to evaluate the consistency, the thermal susceptibility and the safety of the binder. It was performed through penetration, softening point (ring-and-ball) and flash point (Cleveland open cup) tests. Rheological characterization was performed using the Brookfield rotational viscometer and the Dynamic Shear Rheometer (DSR). The rheological tests allowed the determination of workability and viscoelasticity parameters ( $G^*$ ,  $\delta$ ,  $G^*/\sin\delta$  and  $G^*\times\sin\delta$ ). To perform durability characterization, the samples were aged in the Rolling Thin-Film Oven Test (RTFOT), simulating short-term aging. The samples were also aged in the Pressure Aging Vessel (PAV), to simulate long-term aging. The results indicate a consistency gain, greater resistance to permanent deformation and better resistance to temperature variation of the modified binder.

**Keywords:** Asphalt paving; Modification of asphalt binders; Reuse of waste; Wood waste ash.

**LISTA DE FIGURAS**

<b>Figura 1.</b> Classificação do estado de conservação dos pavimentos. ....	15
<b>Figura 2.</b> Estrutura básica dos pavimentos asfálticos .....	18
<b>Figura 3.</b> Deformação permanente .....	20
<b>Figura 4.</b> Trincas por fadiga.....	20
<b>Figura 5.</b> Trincas térmicas .....	20
<b>Figura 6.</b> Relação entre tensão e deformação .....	22
<b>Figura 7.</b> Representação dos componentes do CAP .....	23
<b>Figura 8.</b> Fracionamento químico do CAP .....	24
<b>Figura 9.</b> Modelo de micelas de Yen.....	25
<b>Figura 10.</b> Representação do CAP tipo Sol e Gel.....	25
<b>Figura 11.</b> Modelo SHRP .....	26
<b>Figura 12.</b> Etapas do envelhecimento.....	27
<b>Figura 13.</b> Fluxograma para caracterização do CAP .....	29
<b>Figura 14.</b> Tonel de armazenamento do CAP .....	31
<b>Figura 15.</b> Cinza após peneiramento.....	31
<b>Figura 16.</b> Adição da cinza .....	31
<b>Figura 17.</b> Início da mistura .....	31
<b>Figura 18.</b> Homogeneização.....	31
<b>Figura 19.</b> Ensaio de Penetração .....	33
<b>Figura 20.</b> Aparelhagem para o ensaio de penetração .....	33
<b>Figura 21.</b> Penetrômetro.....	33
<b>Figura 22.</b> Capsula com a amostra de ligante.....	33
<b>Figura 23.</b> Posicionamento da cuba de transferência .....	34
<b>Figura 24.</b> Posicionamento da agulha.....	34
<b>Figura 25.</b> Realização da leitura .....	34
<b>Figura 26.</b> Ponto de Amolecimento.....	34
<b>Figura 27.</b> Aparelhagem para o ensaio de anel e bola.....	35
<b>Figura 28.</b> Anéis com a amostra de ligante.....	35
<b>Figura 29.</b> Raspagem do excesso .....	35
<b>Figura 30.</b> Posicionamento das bolas de aço .....	35
<b>Figura 31.</b> Execução do ensaio .....	35
<b>Figura 32.</b> Momento em que o CAP toca a placa inferior.....	35
<b>Figura 33.</b> Ponto de fulgor .....	36
<b>Figura 34.</b> Equipamento para o ponto de fulgor.....	37

<b>Figura 35.</b> Cuba com a amostra .....	37
<b>Figura 36.</b> Posicionamento do termômetro .....	37
<b>Figura 37.</b> Passagem da chama de ensaio .....	37
<b>Figura 38.</b> Gases sendo emanados .....	37
<b>Figura 39.</b> Identificação do ponto de fulgor .....	37
<b>Figura 40.</b> Esquema do equipamento* .....	38
<b>Figura 41.</b> Esquema do spindle .....	38
<b>Figura 42.</b> Viscosímetro rotacional brookfield .....	39
<b>Figura 43.</b> Aparelhagem .....	39
<b>Figura 44.</b> Posicionamento da capsula no recipiente térmico .....	39
<b>Figura 45.</b> Posicionamento do spindle no recipiente térmico .....	40
<b>Figura 46.</b> Spindle submerso na amostra .....	40
<b>Figura 47.</b> Execução do ensaio .....	40
<b>Figura 48.</b> Componentes do Módulo Complexo G* .....	41
<b>Figura 49.</b> Comportamento viscoelástico do CAP .....	41
<b>Figura 50.</b> Esquema das placas .....	41
<b>Figura 51.</b> Defasagem entre a tensão e a deformação .....	41
<b>Figura 52.</b> Reômetro de cisalhamento dinâmico .....	43
<b>Figura 53.</b> Aparelhagem .....	43
<b>Figura 54.</b> Encaixe da placa superior .....	43
<b>Figura 55.</b> Montagem da placa inferior .....	43
<b>Figura 56.</b> Definição do “zero gap” .....	43
<b>Figura 57.</b> Molde de 25 mm .....	43
<b>Figura 58.</b> Posicionamento da amostra entre as placas .....	43
<b>Figura 59.</b> Aproximação das placas .....	43
<b>Figura 60.</b> Remoção do excesso de ligante .....	43
<b>Figura 61.</b> Esquema do RTFOT .....	46
<b>Figura 62.</b> Estufa (RTFOT) .....	47
<b>Figura 63.</b> Recipiente vazio .....	47
<b>Figura 64.</b> Pesagem das amostras .....	47
<b>Figura 65.</b> Rolagem do recipiente .....	48
<b>Figura 66.</b> Resfriamento das amostras .....	48
<b>Figura 67.</b> Execução do ensaio .....	48
<b>Figura 68.</b> Esquema do PAV .....	48
<b>Figura 69.</b> PAV .....	49

<b>Figura 70.</b> Suporte das bandejas .....	49
<b>Figura 71.</b> Bandeja vazia .....	49
<b>Figura 72.</b> Pesagem da amostra.....	50
<b>Figura 73.</b> Posicionamento dentro do PAV .....	50
<b>Figura 74.</b> Amostras dentro do PAV .....	50
<b>Figura 75.</b> Recolhimento do material após ensaio .....	50
<b>Figura 76.</b> Forno a vácuo.....	50
<b>Figura 77.</b> Retirada das bolhas de ar.....	50
<b>Figura 78.</b> Penetração .....	51
<b>Figura 79.</b> Penetração retida .....	51
<b>Figura 80.</b> Ponto de amolecimento .....	52
<b>Figura 81.</b> Aumento do ponto de amolecimento.....	52
<b>Figura 82.</b> IST.....	53
<b>Figura 83.</b> Variação do IST .....	53
<b>Figura 84.</b> Ponto de Fulgor .....	54
<b>Figura 85.</b> Viscosidade x temperatura (50-70) .....	55
<b>Figura 86.</b> Viscosidade x cinza (50-70).....	55
<b>Figura 87.</b> Viscosidade x temperatura (RTFOT) .....	55
<b>Figura 88.</b> Viscosidade x cinza (RTFOT) .....	55
<b>Figura 89.</b> Viscosidade x temperatura (PAV) .....	56
<b>Figura 90.</b> Viscosidade x cinza (PAV).....	56
<b>Figura 91.</b> Viscosidade x temperatura (sem modificação).....	56
<b>Figura 92.</b> Variação da viscosidade x temperatura (sem modificação) .....	56
<b>Figura 93.</b> Viscosidade x temperatura (05% de cinza).....	57
<b>Figura 94.</b> Variação da viscosidade x temperatura (05% de cinza).....	57
<b>Figura 95.</b> Viscosidade x temperatura (10% de cinza).....	57
<b>Figura 96.</b> Variação da viscosidade x temperatura (10% de cinza).....	57
<b>Figura 97.</b> Viscosidade x temperatura (15% de cinza).....	57
<b>Figura 98.</b> Variação da viscosidade x temperatura (15% de cinza).....	57
<b>Figura 99.</b> Viscosidade x temperatura (20% de cinza).....	58
<b>Figura 100.</b> Variação da viscosidade x temperatura (20% de cinza).....	58
<b>Figura 101.</b> Viscosidade x cinza (135 °C) .....	58
<b>Figura 102.</b> Variação da viscosidade x cinza (135 °C).....	58
<b>Figura 103.</b> Viscosidade x cinza (150 °C) .....	59
<b>Figura 104.</b> Variação da viscosidade x cinza (150 °C).....	59

<b>Figura 105.</b> Viscosidade x cinza (177 °C) .....	59
<b>Figura 106.</b> Variação da viscosidade x cinza (177 °C) .....	59
<b>Figura 107.</b> Módulo complexo e ângulo de fase x temperatura (50-70) .....	60
<b>Figura 108.</b> Módulo complexo e ângulo de fase x temperatura (RTFOT) .....	60
<b>Figura 109.</b> Tensão de cisalhamento x temperatura (50-70) .....	60
<b>Figura 110.</b> Tensão de cisalhamento x temperatura (RTFOT) .....	60
<b>Figura 111.</b> Tensão de cisalhamento x cinza (50-70) .....	61
<b>Figura 112.</b> Tensão de cisalhamento x cinza (RTFOT) .....	61
<b>Figura 113.</b> Ângulo de fase x temperatura (sem modificação) .....	62
<b>Figura 114.</b> Variação do ângulo de fase x temperatura (sem modificação) .....	62
<b>Figura 115.</b> Ângulo de fase x temperatura (05% cinza) .....	62
<b>Figura 116.</b> Variação do ângulo de fase x temperatura (05% cinza) .....	62
<b>Figura 117.</b> Ângulo de fase x temperatura (10% cinza) .....	62
<b>Figura 118.</b> Variação do ângulo de fase x temperatura (10% cinza) .....	62
<b>Figura 119.</b> Ângulo de fase x temperatura (15% cinza) .....	63
<b>Figura 120.</b> Variação do ângulo de fase x temperatura (15% cinza) .....	63
<b>Figura 121.</b> Ângulo de fase x temperatura (20% cinza) .....	63
<b>Figura 122.</b> Variação do ângulo de fase x temperatura (20% cinza) .....	63
<b>Figura 123.</b> Ângulo de fase x cinza (50-70) .....	63
<b>Figura 124.</b> Ângulo de fase x cinza (RTFOT) .....	63
<b>Figura 125.</b> Ângulo de fase x cinza (40 °C) .....	64
<b>Figura 126.</b> Variação do ângulo de fase x cinza (40 °C) .....	64
<b>Figura 127.</b> Ângulo de fase x cinza (46 °C) .....	64
<b>Figura 128.</b> Variação do ângulo de fase x cinza (46 °C) .....	64
<b>Figura 129.</b> Ângulo de fase x cinza (52 °C) .....	65
<b>Figura 130.</b> Variação do ângulo de fase x cinza (52 °C) .....	65
<b>Figura 131.</b> Ângulo de fase x cinza (58 °C) .....	65
<b>Figura 132.</b> Variação do ângulo de fase x cinza (58 °C) .....	65
<b>Figura 133.</b> Ângulo de fase x cinza (64 °C) .....	65
<b>Figura 134.</b> Variação do ângulo de fase x cinza (64 °C) .....	65
<b>Figura 135.</b> Ângulo de fase x cinza (70 °C) .....	66
<b>Figura 136.</b> Variação do ângulo de fase x cinza (70 °C) .....	66
<b>Figura 137.</b> Ângulo de fase x cinza (76 °C) .....	66
<b>Figura 138.</b> Variação do ângulo de fase x cinza (76 °C) .....	66
<b>Figura 139.</b> Módulo complexo x temperatura (sem modificação) .....	67



<b>Figura 140.</b> Variação do módulo complexo x temperatura (sem modificação) .....	67
<b>Figura 141.</b> Módulo complexo x temperatura (05% cinza) .....	67
<b>Figura 142.</b> Variação do módulo complexo x temperatura (05% cinza) .....	67
<b>Figura 143.</b> Módulo complexo x temperatura (10% cinza) .....	67
<b>Figura 144.</b> Variação do módulo complexo x temperatura (10% cinza) .....	67
<b>Figura 145.</b> Módulo complexo x temperatura (15% cinza) .....	68
<b>Figura 146.</b> Variação do módulo complexo x temperatura (15% cinza) .....	68
<b>Figura 147.</b> Módulo complexo x temperatura (20% cinza) .....	68
<b>Figura 148.</b> Variação do módulo complexo x temperatura (20% cinza) .....	68
<b>Figura 149.</b> Módulo complexo x cinza (50-70) .....	69
<b>Figura 150.</b> Módulo complexo x cinza (RTFOT).....	69
<b>Figura 151.</b> Módulo complexo x cinza (40 °C) .....	69
<b>Figura 152.</b> Variação do módulo complexo x cinza (40 °C).....	69
<b>Figura 153.</b> Módulo complexo x cinza (46 °C) .....	70
<b>Figura 154.</b> Variação do módulo complexo x cinza (46 °C).....	70
<b>Figura 155.</b> Módulo complexo x cinza (52 °C) .....	70
<b>Figura 156.</b> Variação do módulo complexo x cinza (52 °C).....	70
<b>Figura 157.</b> Módulo complexo x cinza (58 °C) .....	70
<b>Figura 158.</b> Variação do módulo complexo x cinza (58 °C).....	70
<b>Figura 159.</b> Módulo complexo x cinza (64 °C) .....	71
<b>Figura 160.</b> Variação do módulo complexo x cinza (64 °C).....	71
<b>Figura 161.</b> Módulo complexo x cinza (70 °C) .....	71
<b>Figura 162.</b> Variação do módulo complexo x cinza (70 °C).....	71
<b>Figura 163.</b> Módulo complexo x cinza (76 °C) .....	71
<b>Figura 164.</b> Variação do módulo complexo x cinza (76 °C).....	71
<b>Figura 165.</b> Componentes elásticas e viscosas (50-70 sem modificação) .....	72
<b>Figura 166.</b> Componentes elásticas e viscosas (RTFOT sem modificação).....	72
<b>Figura 167.</b> Componentes elásticas e viscosas (50-70 + 05% cinza).....	73
<b>Figura 168.</b> Componentes elásticas e viscosas (RTFOT + 05% cinza).....	73
<b>Figura 169.</b> Componentes elásticas e viscosas (50-70 + 10% cinza).....	73
<b>Figura 170.</b> Componentes elásticas e viscosas (RTFOT + 10% cinza).....	73
<b>Figura 171.</b> Componentes elásticas e viscosas (50-70 + 15% cinza).....	73
<b>Figura 172.</b> Componentes elásticas e viscosas (RTFOT + 15% cinza).....	73
<b>Figura 173.</b> Componentes elásticas e viscosas (50-70 + 20% cinza).....	74
<b>Figura 174.</b> Componentes elásticas e viscosas (RTFOT + 20% cinza).....	74

<b>Figura 175.</b> $G^*/\sin(\delta)$ x temperatura (50-70) .....	74
<b>Figura 176.</b> $G^*/\sin(\delta)$ x temperatura (RTFOT) .....	74
<b>Figura 177.</b> $G^*/\sin(\delta)$ x temperatura (sem modificação).....	75
<b>Figura 178.</b> Variação de $G^*/\sin(\delta)$ x temperatura (sem modificação).....	75
<b>Figura 179.</b> $G^*/\sin(\delta)$ x temperatura (05% cinza) .....	75
<b>Figura 180.</b> Variação de $G^*/\sin(\delta)$ x temperatura (05% de cinza) .....	75
<b>Figura 181.</b> $G^*/\sin(\delta)$ x temperatura (10% cinza).....	76
<b>Figura 182.</b> Variação de $G^*/\sin(\delta)$ x temperatura (10% de cinza) .....	76
<b>Figura 183.</b> $G^*/\sin(\delta)$ x temperatura (15% cinza).....	76
<b>Figura 184.</b> Variação de $G^*/\sin(\delta)$ x temperatura (15% de cinza) .....	76
<b>Figura 185.</b> $G^*/\sin(\delta)$ x temperatura (20% cinza).....	76
<b>Figura 186.</b> Variação de $G^*/\sin(\delta)$ x temperatura (20% de cinza) .....	76
<b>Figura 187.</b> $G^*/\sin(\delta)$ x cinza (50-70).....	77
<b>Figura 188.</b> $G^*/\sin(\delta)$ x cinza (RTFOT) .....	77
<b>Figura 189.</b> $G^*/\sin(\delta)$ x cinza (40 °C).....	78
<b>Figura 190.</b> Variação do $G^*/\sin(\delta)$ x cinza (40 °C) .....	78
<b>Figura 191.</b> $G^*/\sin(\delta)$ x cinza (46 °C).....	78
<b>Figura 192.</b> Variação do $G^*/\sin(\delta)$ x cinza (46 °C) .....	78
<b>Figura 193.</b> $G^*/\sin(\delta)$ x cinza (52 °C).....	78
<b>Figura 194.</b> Variação do $G^*/\sin(\delta)$ x cinza (52 °C) .....	78
<b>Figura 195.</b> $G^*/\sin(\delta)$ x cinza (58 °C).....	79
<b>Figura 196.</b> Variação do $G^*/\sin(\delta)$ x cinza (58 °C) .....	79
<b>Figura 197.</b> $G^*/\sin(\delta)$ x cinza (64 °C).....	79
<b>Figura 198.</b> Variação do $G^*/\sin(\delta)$ x cinza (64 °C) .....	79
<b>Figura 199.</b> $G^*/\sin(\delta)$ x cinza (70 °C).....	79
<b>Figura 200.</b> Variação do $G^*/\sin(\delta)$ x cinza (70 °C) .....	79
<b>Figura 201.</b> $G^*/\sin(\delta)$ x cinza (76 °C).....	80
<b>Figura 202.</b> Variação do $G^*/\sin(\delta)$ x cinza (76 °C) .....	80
<b>Figura 203.</b> Módulo complexo e ângulo de fase x temperatura (PAV) .....	81
<b>Figura 204.</b> Tensão de cisalhamento x temperatura (PAV).....	81
<b>Figura 205.</b> Ângulo de fase x cinza (PAV) .....	81
<b>Figura 206.</b> Módulo complexo x cinza (PAV) .....	82
<b>Figura 207.</b> Componentes elásticas e viscosas (PAV sem modificação) .....	82
<b>Figura 208.</b> Componentes elásticas e viscosas (PAV + 05% cinza) .....	82
<b>Figura 209.</b> Componentes elásticas e viscosas (PAV + 10% cinza) .....	83

<b>Figura 210.</b> Componentes elásticas e viscosas (PAV + 15% cinza) .....	83
<b>Figura 211.</b> Componentes elásticas e viscosas (PAV + 20% cinza) .....	83
<b>Figura 212.</b> $G^* \cdot \sin(\delta)$ x temperature.....	84
<b>Figura 213.</b> $G^* \cdot \sin(\delta)$ x cinza .....	84
<b>Figura 214.</b> Temp. de falha x cinza (50-70 e RTFOT).....	85
<b>Figura 215.</b> Grau de desempenho – PG para alta temperatura .....	85
<b>Figura 216.</b> Variação em massa após RTFOT.....	86
<b>Figura 217.</b> Índice de envelhecimento x cinza (Viscosidade) .....	87

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Parâmetros avaliados.....	30
<b>Tabela 2.</b> Ensaios de caracterização física e as normas de referência .....	32
<b>Tabela 3.</b> Ensaios de caracterização reológica e as normas de referência .....	38
<b>Tabela 4.</b> Condições de ensaio.....	39
<b>Tabela 5.</b> Ensaios de caracterização da durabilidade e as normas de referência .....	46
<b>Tabela 6.</b> Classificação por grau de desempenho.....	85

## SUMÁRIO

RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	iv
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	15
2 OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo geral.....	17
2.2 Objetivos específicos .....	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	18
3.1 Pavimento asfáltico .....	18
3.1.1 Patologias encontradas nos pavimentos flexíveis .....	19
3.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	21
3.2.1 Reologia.....	22
3.2.2 Constituição química e estrutura molecular.....	23
3.2.3 Envelhecimento.....	26
4 METODOLOGIA .....	29
4.1 Materiais .....	30
4.2 Modificação do CAP.....	31
4.3 Caracterização física.....	32
4.3.1 Penetração.....	32
4.3.2 Ponto de amolecimento.....	34
4.3.3 Ponto de fulgor.....	36
4.4 Caracterização reológica.....	37
4.4.1 Viscosidade rotacional Brookfield.....	38
4.4.2 Reômetro de cisalhamento dinâmico .....	40
4.4.2.1 Parâmetro de resistência à deformação permanente ( $G^*/\sin\delta$ ) .....	41
4.4.2.2 Parâmetro de resistência ao trincamento por fadiga ( $G^*.\sin\delta$ ).....	43
4.4.3 Grau de desempenho.....	44
4.5 Caracterização da durabilidade .....	46
4.5.1 Envelhecimento de curto prazo .....	46
4.5.2 Envelhecimento de longo prazo .....	48
5 RESULTADOS.....	51
5.1 Ligante modificado .....	51
5.2 Caracterização física.....	51

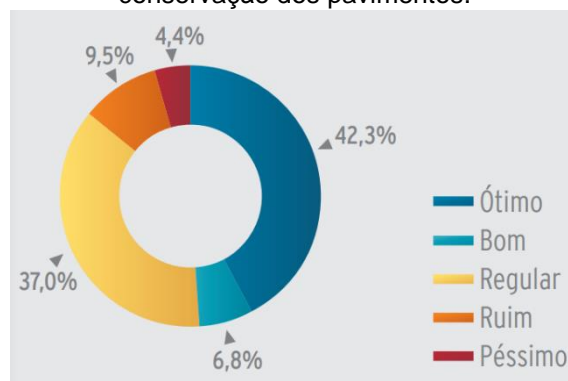
5.2.1	Penetração.....	51
5.2.2	Ponto de amolecimento.....	52
5.2.3	Índice de Susceptibilidade Térmica (IST) .....	53
5.2.4	Ponto de fulgor.....	54
5.3	Caracterização reológica.....	54
5.3.1	Viscosidade rotacional Brookfield.....	54
5.3.2	Análise da resistência à deformação permanente no DSR.....	59
5.3.2.1	Ângulo de fase ( $\delta$ ).....	61
5.3.2.2	Módulo complexo ( $G^*$ ).....	66
5.3.2.3	Comportamento viscoelástico .....	71
5.3.2.4	Parâmetro de resistência à deformação permanente ( $G^*/\sin\delta$ ) .....	74
5.3.3	Análise da resistência ao trincamento por fadiga no DSR .....	80
5.3.3.1	Ângulo de fase ( $\delta$ ).....	81
5.3.3.2	Módulo complexo ( $G^*$ ).....	81
5.3.3.3	Comportamento viscoelástico .....	82
5.3.3.4	Parâmetro de resistência ao trincamento por fadiga ( $G^*.\sin\delta$ ).....	83
5.3.4	Grau de desempenho em altas temperaturas .....	84
5.4	Caracterização da durabilidade .....	85
5.4.1	Grau de envelhecimento .....	85
6	CONCLUSÕES .....	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	91

## 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O meio de transporte mais utilizado no Brasil, tanto para o transporte de cargas como de passageiros, é o rodoviário e é de fundamental importância no desenvolvimento econômico e social do país. Segundo o boletim estatístico de 2019 da Confederação Nacional do Transporte (CNT), mais de 60% das cargas e mais de 80 milhões de passageiros foram transportados em rodovias em 2017.

As rodovias brasileiras, em sua grande maioria, são compostas por pavimentos flexíveis, porém grande parte apresenta deficiência no estado de conservação, sem garantir segurança e conforto aos usuários. A CNT realiza anualmente pesquisas para avaliar o estado das rodovias nacionais e em seu relatório gerencial de 2018 constatou que dos 107.161 km de rodovias avaliadas, 50,9% apresentam algum tipo de problema no pavimento (**Figura 1**).

**Figura 1.** Classificação do estado de conservação dos pavimentos.



Fonte: CNT (2018).

Os asfaltos convencionais apresentam bom comportamento em praticamente todas as aplicações, mas as crescentes solicitações de tráfego, ocasionadas pelo aumento do número de veículos, o aumento do peso por eixo, as condições externas desfavoráveis e o processo de envelhecimento do ligante, são fatores que contribuem para o surgimento de problemas comuns nos pavimentos como as deformações permanentes (afundamento da trilha de roda) e as trincas ocasionadas por fadiga ou variação térmica.

Aliado a esses problemas, existe a crescente necessidade do setor da construção civil em reutilizar materiais desta e de outras indústrias para minimizar os impactos ambientais causados pelo elevado uso de recursos naturais. É neste contexto que surge a necessidade de se avaliar as propriedades de ligantes asfálticos modificados com resíduos ou rejeitos, que

seriam inicialmente descartados na natureza, diminuindo assim os impactos ambientais causados e promovendo o reaproveitamento desses materiais.

A modificação de ligantes asfálticos mediante a utilização de resíduos, com o objetivo de melhorar seu comportamento mecânico e durabilidade, se mostra uma alternativa viável e eficaz aos ligantes convencionais, tal prática tem se tornado cada vez mais comum e já foram estudados diversos agentes modificadores alternativos, como borracha triturada de pneus, cinza de casca de arroz, bio-óleo, polímeros, dentre outros.

Dessa forma, o presente trabalho se propõe a estudar as características do ligante modificado por cinza de resíduos de madeira e comparar as suas propriedades físicas, reológicas e de durabilidade com o ligante convencional.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo do presente estudo é avaliar as propriedades físicas, reológicas e a durabilidade do ligante asfáltico 50-70 modificado com cinza proveniente da queima de resíduos de madeira.

### **2.2 Objetivos específicos**

Para desenvolver a presente pesquisa, foram considerados os seguintes objetivos específicos:

- a) Preparação de amostras com diferentes quantidades percentuais de cinza, com controle da temperatura, tempo de mistura e velocidade de rotação do misturador mecânico;
- b) Avaliação das propriedades físicas relacionadas com a consistência do CAP e com a sua segurança durante o manuseio, mediante ensaios de penetração, ponto de amolecimento e ponto de fulgor;
- c) Avaliação das propriedades reológicas relacionadas com a trabalhabilidade, resistência à deformação permanente, resistência ao trincamento por fadiga e o grau de desempenho do ligante em altas temperaturas, a partir dos ensaios de viscosidade rotacional Brookfield e cisalhamento dinâmico;
- d) Avaliação da durabilidade do ligante mediante caracterização física e reológica das amostras após serem envelhecidas no curto e no longo prazo.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

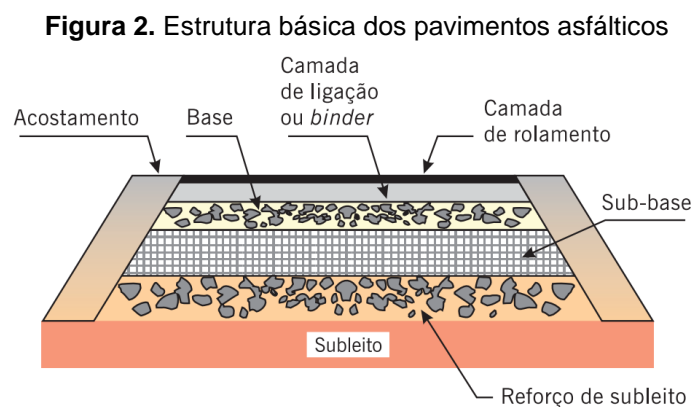
Este capítulo será composto por uma breve introdução sobre os tipos de pavimento, suas funcionalidades e seus materiais constituintes, com foco em pavimentos flexíveis e ligantes asfálticos.

#### 3.1 Pavimento asfáltico

O pavimento é uma estrutura formada por várias camadas horizontais de diferentes espessuras e materiais, que são dispostas umas sobre as outras após a terraplanagem da fundação e tem como objetivo resistir aos esforços do tráfego e do clima a fim de proporcionar segurança e conforto aos usuários durante todo o horizonte de projeto (BERNUCCI et al., 2008).

Tradicionalmente os pavimentos são classificados de acordo com os materiais que os constituem e com a forma a que resistem aos esforços. Os pavimentos rígidos são aqueles em que o revestimento é composto por uma placa de concreto de cimento Portland e caracteriza-se por possuir elevada rigidez em relação às demais camadas, o que faz com que esse absorva praticamente todas as tensões provenientes do tráfego a que é submetido. O pavimento flexível, também designado pavimento asfáltico, tem seu revestimento composto basicamente por agregados e ligantes betuminosos. Neste caso, os carregamentos provenientes do tráfego são distribuídos de forma proporcional à rigidez de suas camadas que sofrem deformações elásticas significativas (DNIT, 2006).

O pavimento flexível é composto basicamente por quatro camadas principais: revestimento, base, sub-base e reforço do subleito. A **Figura 2** apresenta a configuração básica da estrutura de um pavimento asfáltico.



Fonte: Bernucci et al., (2008).

O revestimento asfáltico é a camada superficial do pavimento e está submetido diretamente ao contato com as rodas dos veículos e as condições climáticas. É composto pela associação de agregados e ligante asfáltico. Essa associação pode ser realizada diretamente na pista ou mediante mistura em usina e posterior transporte para aplicação na via. No primeiro caso tem-se o tratamento superficial, o qual pode ser realizado por meio de penetração invertida ou mediante penetração direta. Na penetração invertida são aplicadas camadas de ligante asfáltico seguidas por espalhamento e compressão de igual número de camadas de agregados. Na penetração direta as camadas de agregados são espalhadas e compactadas e recebem posteriormente a camada de material betuminoso seguido de compressão, sendo distribuída na última camada uma aplicação de agregado miúdo. No caso das misturas usinadas, os agregados e o ligante asfáltico são previamente envolvidos na usina antes da compactação (BERNUCCI et al., 2008; DNIT, 2006).

A base, sub-base e o subleito são compostos basicamente por materiais granulares, solos ou a mistura destes, tendo como principal função resistir e distribuir os esforços verticais à fundação. As bases e sub-bases granulares trabalham principalmente aos esforços de compressão, possuindo baixa resistência à tração, essa característica está ligada à baixa coesão destes materiais. Com base nos materiais utilizados para sua execução, as bases e sub-bases flexíveis podem ser estabilizadas granulometricamente, estabilizadas com ligante asfáltico e ainda do tipo macadame hidráulico ou macadame seco. A estabilização granulométrica ocorre por compactação da mistura de materiais com granulometria e índices geotécnicos específicos. O macadame hidráulico consiste na distribuição de agregados graúdos que, após a compactação, tem seus vazios preenchidos por agregados miúdos e a penetração desse material de enchimento é realizada com auxílio de água e compressão. Por outro lado, o macadame seco diferencia-se do hidráulico pela granulometria e pela não utilização de água. A estabilização com asfalto ocorre por meio da adição de material betuminoso, que melhora as propriedades de resistência à tração e compressão em relação aos materiais originais (DNIT, 2006).

### **3.1.1 Patologias encontradas nos pavimentos flexíveis**

Os principais problemas que surgem nos pavimentos asfálticos são: a deformação permanente, onde se verifica uma deformação vertical excessiva ou afundamento nas trilhas de roda, o trincamento por fadiga, provocada por repetições das tensões de tração na parte inferior do pavimento e o trincamento térmico que ocorre por variações de temperatura (TAIRA, 2001).

A deformação permanente é ocasionada pelo acúmulo de pequenas deformações plásticas sucessivas que ocorrem a cada carregamento e não podem ser recuperadas (BRINGEL, 2007). É caracterizada pela depressão da superfície do pavimento, podendo ser acompanhada de solevamento (elevação lateral de material) e pode apresentar-se sob a forma de afundamento plástico ou de consolidação (DNIT, 2003).

O afundamento plástico é causado pela fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito acompanhado de solevamento (DNIT, 2003). Ocorre quando os esforços impostos ao pavimento superam a resistência ao cisalhamento dos materiais (DNIT, 2006).

O afundamento de consolidação é causado pela consolidação diferencial de uma ou mais camadas do pavimento ou subleito sem estar acompanhado de solevamento (DNIT, 2003). Neste caso, há uma diminuição do volume do revestimento nas trilhas de roda (TAIRA, 2001). Essa patologia ocorre principalmente devido à densificação da mistura ocasionado pela compactação insuficiente (DNIT, 2006).

O trincamento por fadiga é resultado de efeitos cumulativos de carregamentos sucessivos em temperaturas intermediárias. É caracterizado em sua fase final pelas trincas de “couro de jacaré” e usualmente confinadas nas trilhas de roda (DNIT, 2006).

O trincamento térmico ocorre por condições ambientais adversas sendo resultante da contração do pavimento em baixas temperaturas (BRINGEL, 2007).

**Figura 3.** Deformação permanente



**Figura 4.** Trincas por fadiga



**Figura 5.** Trincas térmicas



Fonte: Bringel (2007)

### 3.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O ligante asfáltico utilizado em pavimentação é derivado da destilação do petróleo. Sua associação com agregados minerais forma a mistura asfáltica e o seu emprego em pavimentos flexíveis é uma prática utilizada mundialmente (ROBERTS et al., 1996).

As principais razões que justificam seu uso intensivo em obras de pavimentação estão relacionadas com a sua capacidade coesiva, que garante forte união entre os agregados, a sua capacidade impermeabilizante e a sua durabilidade e resistência à ação de agentes agressivos externos (BERNUCCI et al., 2008).

Segundo a NBR 7208, o asfalto é um material de cor escura que tem o betume como o seu constituinte principal e pode ocorrer na natureza ou ser obtido pelo processamento do petróleo. O Betume por sua vez é um material cimentício de consistência sólida, semi-sólida ou viscosa, composto principalmente por hidrocarbonetos de alto peso molecular e completamente solúvel no bissulfeto de carbono. O asfalto obtido mediante o refino do petróleo é produzido para apresentar especificações próprias para aplicação em pavimentação e é denominado Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).

Samanos (1985) apud. Leite (1990) define o CAP como um adesivo termoplástico, viscoelástico, impermeável à água e pouco reativo. A propriedade termoplástica desse material garante seu manuseio a quente para aplicação em pavimentação e o retorno às suas características viscoelásticas após o resfriamento. A propriedade de viscoelasticidade diz respeito ao seu comportamento mecânico durante aplicação de carregamento, possuindo dois comportamentos distintos: elástico e viscoso. O elástico ocorre sob aplicação de carga de curta duração e o viscoso sob aplicação de cargas de longa duração. A pouca reatividade desse material garante maior durabilidade ao pavimento asfáltico, já que os processos de oxidação ocorrem de forma mais lenta. Por fim, a impermeabilização garante o escoamento da água para os canais de drenagem, sem que essa penetre no interior do pavimento.

O CAP tem seu estado físico e consistência alterados mediante variação de temperatura, sendo um semi-sólido em baixas temperaturas, viscoelástico em temperatura ambiente e líquido em altas temperaturas (BERNUCCI et al., 2008).

Além da temperatura, a intensidade e o tempo das solicitações também influenciam o comportamento mecânico do CAP, sendo de fundamental importância o estabelecimento de padrões que permitam caracterizar esse material. Assim, o CAP usado em pavimentação deve apresentar características que respeitem os critérios estabelecidos nas especificações aplicáveis, de modo que seja possível prever seu comportamento (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2016).

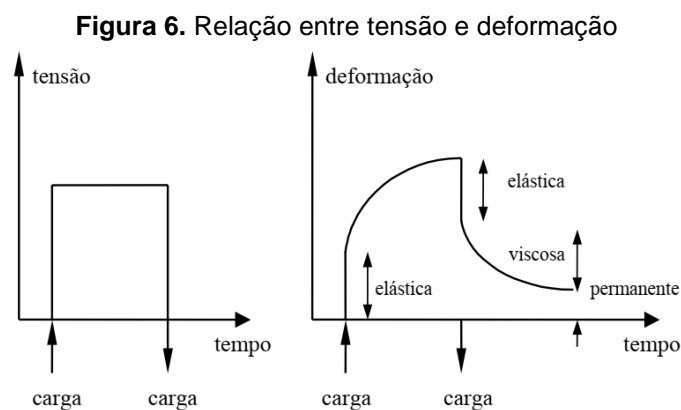
Com relação às especificações Brasileiras, o CAP pode ser caracterizado em função de suas propriedades, que são expressas por meio do grau de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade, ductilidade e susceptibilidade térmica. O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), em sua norma DNIT 095, especifica valores máximos e mínimos exigíveis dessas propriedades para aplicação em pavimentação. Essa norma classifica o CAP de acordo com o grau de penetração, tendo-se: CAP 30-45, CAP 50-70, CAP 85-100 e CAP 150-200.

### 3.2.1 Reologia

A reologia pode ser definida como a ciência que estuda o escoamento e a deformação da matéria, ou ainda, o estudo da relação entre a tensão e a deformação de um material em função do tempo e da temperatura (READ; WHITEOAK, 2003).

O CAP pode ser considerado um material viscoelástico e sua resistência à deformação depende tanto da temperatura quanto do tempo de aplicação de carregamentos. Em baixas temperaturas e carregamentos de curta duração o CAP se comporta como um sólido elástico, em altas temperaturas e carregamentos de longa duração o CAP se comporta como um líquido viscoso (LEITE, 1990).

A relação entre tensão e deformação do CAP pode ser observada na **Figura 6**. A aplicação do carregamento causa uma deformação instantânea, elástica, e apesar da magnitude do carregamento se manter constante, a deformação continua aumentando devido ao comportamento viscoso do material. Ao remover o carregamento, o CAP recupera parte da deformação instantaneamente (elástica), seguido de uma recuperação adicional (viscosa) e mantendo uma deformação permanente (plástica) (PINHEIRO, 2004).



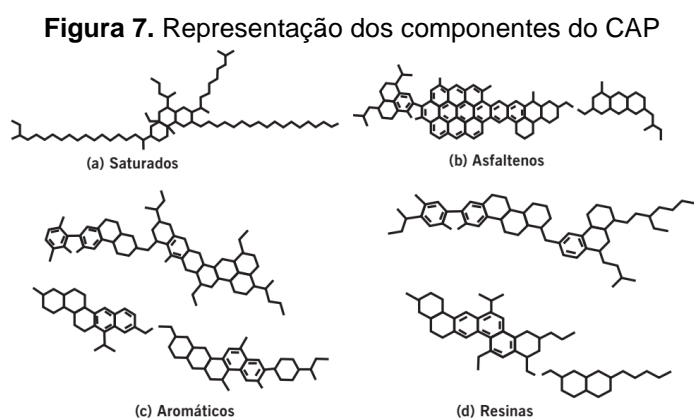
Fonte: Pinheiro (2004).

### 3.2.2 Constituição química e estrutura molecular

A constituição química e a estrutura (arranjo físico) das moléculas do CAP determinam seu comportamento reológico (READ; WHITEOAK, 2003). Além do desempenho físico e mecânico, a constituição química do CAP tem influência nos processos de incorporação de agentes modificadores (BERNUCCI et al., 2008).

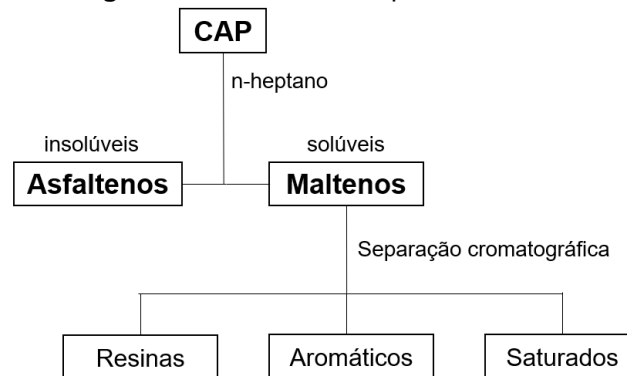
O asfalto é constituído por 90 a 95% de hidrocarbonetos e um teor significativo de 5 a 10% de heteroátomos, sendo que os mais comumente encontrados são o oxigênio, enxofre, nitrogênio e outros metais como níquel, ferro, magnésio, vanádio e cálcio (LEITE, 1999 apud BERNUCCI et al., 2008). Análises elementares de asfaltos manufacturados podem apresentar 82 a 88% de carbono, 8 a 11% de hidrogênio, 0 a 6% de enxofre, 0 a 1,5% de oxigênio e 0 a 1% de nitrogênio (READ; WHITEOAK, 2003).

A composição química do CAP é extremamente complexa e sua análise completa seria extremamente trabalhosa. Todavia, é possível separar o asfalto em dois grupos principais chamados asfaltenos e maltenos. Os maltenos podem ser divididos em saturados, aromáticos e resinas (READ; WHITEOAK, 2003). A **Figura 7** mostra uma representação esquemática dos componentes do CAP.



**Fonte:** Read e Whiteoak (2003) apud Bernucci et al. (2008)

O fracionamento químico é o método de separação dos compostos do CAP através da adição de um solvente. Um dos métodos analíticos mais utilizados foi desenvolvido por Corbett e normalizado pela ASTM D 4124 e é denominado fracionamento SARA (**Figura 8**). Primeiramente os asfaltenos (A) são separados por precipitação com adição de n-heptano, em seguida os compostos saturados (S), aromáticos (A) e as resinas (R), solúveis em n-heptano, são separados através de cromatografia de adsorção (LEITE, 1990).

**Figura 8.** Fracionamento químico do CAP

Fonte: Silva (2005) (Adaptado)

Os asfaltenos são sólidos amorfos, insolúveis em heptano normal, de cor preta ou castanha, contendo além de carbono e hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio. São geralmente considerados materiais aromáticos, altamente polarizados, de peso molecular relativamente elevado. A quantidade de asfaltenos tem efeito significativo nas características reológicas do CAP. Quanto maior a quantidade de asfaltenos mais rígido e viscoso será o CAP (READ; WHITEOAK, 2003).

As resinas, solúveis em heptano normal, são compostos de hidrogênio e carbono, contendo também pequenas quantidades de oxigênio, enxofre e nitrogênio. São sólidos ou semi-sólidos de cor marrom escura, sendo de natureza polar e fortemente adesiva. São agentes dispersantes para os asfaltenos e governam o comportamento como solução (sol) ou como gelatina (gel) do CAP (BERNUCCI et al., 2008).

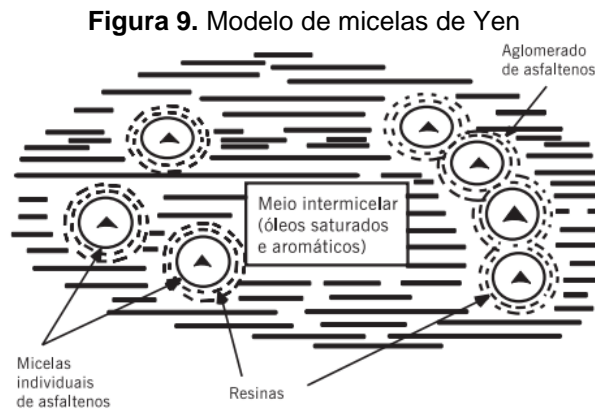
Os aromáticos formam um líquido amarelo viscoso polar, com cadeias não-saturadas de carbono, possuem baixa massa molar, constituindo de 40 a 65% do total do asfalto (BERNUCCI et al, 2008).

Os saturados são óleos viscosos não-polares transparentes formados por cadeias retas ramificadas de hidrocarbonetos e compõem de 5 a 20% do asfalto (BERNUCCI et al, 2008).

A estrutura do CAP pode ser definida como um sistema coloidal formado pela dispersão de micelas com elevado peso molecular (asfaltenos) em um meio dispersante, oleoso, de menor peso molecular (maltenos) (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2016). Os asfaltenos são constituídos por compostos polares e polarizáveis capazes de associação e representam a parte sólida do asfalto. Os maltenos representam a parte líquida do asfalto e são constituídos por hidrocarbonetos aromáticos e saturados (TAIRA, 2001).

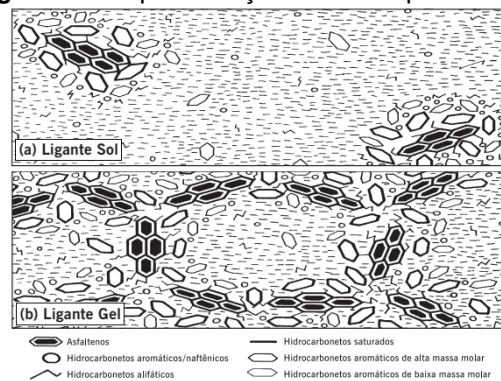


A **Figura 9** apresenta o modelo de Yen ou também chamado modelo de micelas. Afastando-se das micelas (asfaltenos), há uma dispersão gradual para resinas menos polares. Estas camadas estendem-se até o meio oleoso de dispersão. A quantidade relativa e as características dos asfaltenos, resinas e óleos influenciam as propriedades físicas e o desempenho das misturas asfálticas (LUCENA, 2005).



No CAP do tipo Sol (soluções), em presença de quantidades de resinas e aromáticos com poder adequado de solvência, os asfaltenos são totalmente dispersos e as micelas resultantes possuem boa mobilidade (**Figura 10(a)**). O CAP do tipo Sol exibe características de fluido Newtoniano, apresentando alta susceptibilidade térmica e baixo ponto de amolecimento. Devido a sua alta capacidade de fluxo plástico, é mais mole e pouco resistente a aplicação direta de carregamento, porém possui maior capacidade de retorno das micelas à posição original.

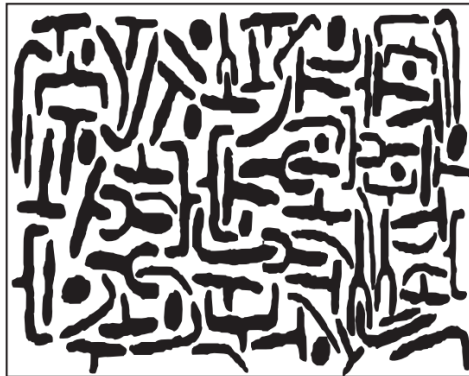
**Figura 10. Representação do CAP tipo Sol e Gel**



No CAP do tipo Gel (gelatinosos) a razão de aromáticos/resinas não é suficiente para dispersar as micelas, ou possuem baixo poder de solvência, deixando os asfaltenos livres para associação e formando estruturas irregulares com aberturas entre as micelas interligadas (**Figura 10(b)**). O CAP do tipo Gel tem menor susceptibilidade térmica e maior ponto de amolecimento, exibindo comportamento de um fluido não-Newtoniano. Além disso, é mais duro e resistente a aplicação de carregamento, porém apresenta menor capacidade de retorno das micelas à posição original (LUCENA, 2005).

Outro modelo estudado atualmente para a estrutura do CAP é o proposto por pesquisadores do Strategic Highway Research Program (SHRP). Este modelo considera que o CAP é composto por várias moléculas polares e não-polares, ligadas por forças intra e intermoleculares (Van der Waals, ligações de hidrogênio e ligações  $\pi$ - $\pi$ ), que são responsáveis pela formação de redes tridimensionais que explicam as características viscoelásticas do CAP. Neste modelo os grupos polares interagem uns com os outros formando ligações fracas e essas ligações são constantemente quebradas e reformuladas (modelo dinâmico). Um aumento na temperatura ou a atuação de forças cisalhantes destrói essas interações reduzindo a elasticidade e aumentando as características viscosas (LUCENA, 2005). A representação do modelo SHRP é apresentada na **Figura 11**.

**Figura 11.** Modelo SHRP

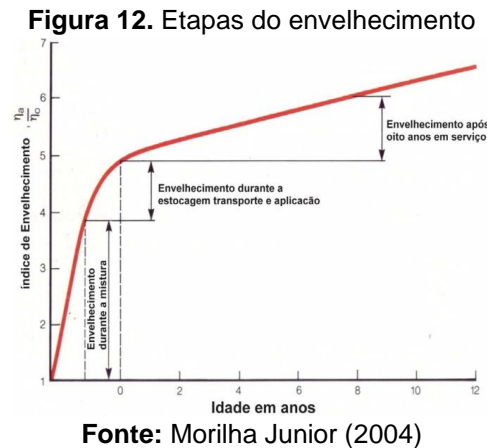


**Fonte:** Soares (2000) apud. Lucena (2005)

### 3.2.3 Envelhecimento

O envelhecimento do ligante é um dos principais mecanismos de deterioração dos pavimentos e ocorre em duas fases. A primeira, mais agressiva, é chamada de envelhecimento de curto prazo. Se inicia durante as operações de usinagem da mistura asfáltica, espalhamento e compactação na via. Ocorre devido às elevadas temperaturas e ao oxigênio do ar. A segunda fase é chamada de envelhecimento de longo prazo e ocorre quando o pavimento entra em serviço e fica submetido à ação do tráfego e das condições climáticas,

as alterações nas propriedades do CAP ocorrem com menor intensidade durante essa etapa (LEITE, 1990; PINTO; PINTO, 2018). A **Figura 12** apresenta a evolução do índice de envelhecimento (relação entre a viscosidade após um dado período de envelhecimento e a viscosidade inicial) em função do tempo e das etapas de produção da mistura asfáltica.



O processo de envelhecimento tem como consequência o ressecamento ou endurecimento do ligante asfáltico devido à presença de oxigênio, radiação UV e variações de temperatura (READ; WHITEOAK, 2003). O envelhecimento altera as propriedades físico-químicas do CAP e afeta o seu comportamento reológico (PINHEIRO, 2004). Essa alteração se traduz no aumento da consistência (diminuição da penetração, aumento da viscosidade e do ponto de amolecimento) (LEITE, 1990; TONIAL, 2001). Esse endurecimento do ligante torna o pavimento asfáltico mais frágil e susceptível ao surgimento de trincas por fadiga ou variação térmica (NASCIMENTO, 2015; SILVA, 2005).

Os principais mecanismos que explicam o endurecimento ou envelhecimento do CAP são a oxidação, a perda de voláteis, o endurecimento físico e o endurecimento exsudativo (READ; WHITEOAK, 2003).

A oxidação é a causa mais importante do envelhecimento do CAP e se inicia durante o processo de produção da mistura asfáltica, sendo mais forte durante a usinagem da mistura devido às altas temperaturas e à presença de ar. Ocorre também durante o espalhamento e compactação na via e posteriormente, de forma mais lenta, ao longo da vida útil do pavimento. Durante a oxidação as moléculas polarizáveis dos maltenos se tornam polares e passam a fazer parte dos asfaltenos. Nesse processo ocorre a diminuição gradativa da proporção de maltenos e aumenta na mesma proporção a quantidade de asfaltenos. Dessa forma, o

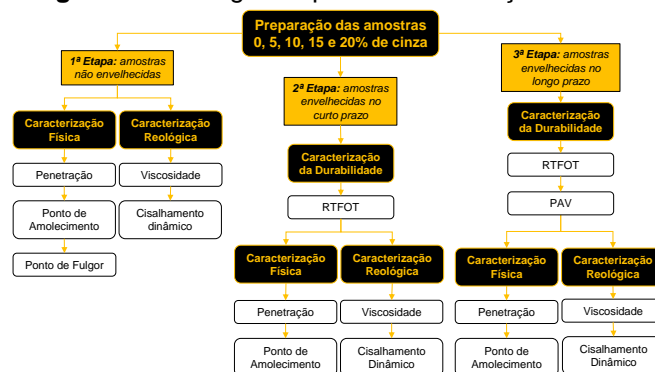
equilíbrio coloidal do CAP se desloca no sentido de diminuir suas propriedades Sol e aumentar as propriedades Gel, levando o CAP a um endurecimento gradativo (TAIRA, 2001).

O endurecimento exsudativo ocorre devido a migração dos compostos oleosos do ligante para o agregado mineral. O endurecimento físico ocorre devido à reordenação das moléculas e da cristalização de parafinas da fração saturada do asfalto. A perda de voláteis acontece por evaporação e depende da temperatura e das condições de exposição (READ; WHITEOAK, 2003).

## 4 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os materiais e métodos utilizados para realização da caracterização física, reológica e de durabilidade do CAP. Os ensaios de caracterização física e reológica foram divididos em três etapas, a primeira antes do envelhecimento, a segunda após o envelhecimento de curto prazo (RTFOT) e a terceira após o envelhecimento de longo prazo (PAV). A **Figura 13** apresenta o fluxograma dos ensaios de caracterização.

**Figura 13.** Fluxograma para caracterização do CAP



Na primeira etapa o CAP foi submetido aos ensaios de penetração, ponto de amolecimento (método do anel e bola), ponto de fulgor e combustão (vaso aberto cleveland), viscosidade rotacional Brookfield e cisalhamento dinâmico.

Na segunda etapa as amostras foram envelhecidas na estufa de filme fino rotativo (Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT), para simular o envelhecimento que o ligante sofre durante a produção da mistura asfáltica, espalhamento e compactação na via. As amostras envelhecidas foram submetidas novamente aos ensaios de caracterização física e reológica através dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional e cisalhamento dinâmico.

Na terceira etapa as amostras foram envelhecidas novamente no RTFOT e posteriormente no vaso de envelhecimento sob pressão (Pressure Aging Vessel, PAV), para simular o envelhecimento que o ligante sofre ao longo de sua vida útil (de 7 a 10 anos). As amostras envelhecidas no PAV foram submetidas novamente aos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional e cisalhamento dinâmico.

Os parâmetros considerados em cada uma das etapas do processo de modificação do CAP foram: a quantidade percentual de cinza, a temperatura do CAP, a temperatura da cinza, o tempo de mistura mecânica e a velocidade de rotação do misturador (**Tabela 1**). Todos os

ensaios foram repetidos para cada percentual de cinza em cada uma das três etapas, totalizando 80 ensaios. Sendo 25 ensaios realizados durante a primeira etapa, 25 durante a segunda e 30 durante a terceira.

**Tabela 1.** Parâmetros avaliados

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Quantidade percentual de cinza	0, 5, 10, 15 e 20%
Temperatura do CAP durante a mistura	150 ± 5 °C
Temperatura da cinza durante a mistura	~100 °C
Tempo de adição da cinza	10 min
Velocidade de rotação durante adição	1000 ± 50 rpm
Tempo de homogeneização	30 min
Velocidade durante homogeneização	2000 ± 50 rpm

#### 4.1 Materiais

O ligante utilizado para modificação e realização dos ensaios foi o CAP 50-70 disponível no Laboratório de Pavimentos da UNILA. Esse ligante, armazenado em tonel metálico de 200 litros, já foi reaquecido diversas vezes para retirada de ligante amolecido. Neste procedimento o tonel é aquecido por uma cinta metálica, configurada a uma temperatura de aproximadamente 135 °C, até que o ligante se torne fluido o suficiente para permitir sua transferência para recipientes menores. Cabe ressaltar que o ligante pode ter envelhecido um pouco devido ao tempo de armazenamento (aproximadamente 2 anos) e aos reaquecimentos para retirada de material para utilização em ensaios laboratoriais. O tonel de armazenamento do CAP é mostrado na **Figura 14**.

A cinza foi obtida em uma indústria cerâmica na região de Foz do Iguaçu-PR e foi produzida a partir da queima de diversos resíduos de madeira como serragem, lenha, carvão e outros rejeitos de madeira em geral. Para sua utilização como modificador do CAP 50-70, a cinza foi peneirada na malha 200 (0,075 mm) e depois colocada em uma estufa a 135 °C durante 30 minutos para redução da umidade. A **Figura 15** mostra a cinza pronta para ser misturada ao ligante.

**Figura 14.** Tonel de armazenamento do CAP**Figura 15.** Cinza após peneiramento

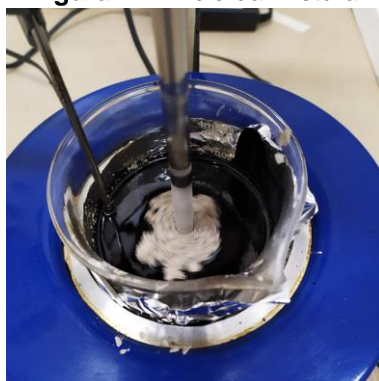
## 4.2 Modificação do CAP

As amostras do CAP modificado foram preparadas considerando a quantidade percentual de cinza em relação à massa total da mistura (ligante + cinza). Os percentuais usados foram: 5, 10, 15 e 20 %. A formulação utilizada para determinar a massa de cinza necessária para cada modificação é apresentada a seguir:

$$M_c = (M_c + M_L) \cdot \frac{x}{100} \quad \text{Equação 1}$$

$$M_c = \frac{M_L \cdot x}{100 - x} \quad \text{Equação 2}$$

onde:  $M_c$  é a massa de cinza a ser adicionada (g),  $M_L$  é a massa de ligante que será usada na mistura (g) e  $x$  é a quantidade percentual de cinza (%).

**Figura 16.** Adição da cinza**Figura 17.** Início da mistura**Figura 18.** Homogeneização

A mistura entre o CAP e a cinza foi realizada em duas etapas utilizando um misturador mecânico. A temperatura do CAP durante a mistura foi mantida em 150 °C e a cinza foi adicionada a uma temperatura de aproximadamente 100 °C.

A primeira etapa foi destinada a adição da cinza, com velocidade de rotação de 1000 rpm e duração de 10 min (**Figura 16**). A segunda etapa foi destinada a homogeneização entre o CAP e a cinza, com velocidade de rotação de 2000 rpm e duração de 30 min (**Figura 18**).

### 4.3 Caracterização física

O estado físico do CAP varia de acordo com as condições de temperatura e carregamento, sendo necessários diversos ensaios que possibilitem o entendimento de seu comportamento e a quantificação de suas propriedades. Dessa forma, para medir as propriedades físicas dos ligantes asfálticos, as normas estabelecem valores específicos de temperatura, tempo e carregamento. Os ensaios realizados para caracterização física do CAP e as normas utilizadas como referência são apresentados na **Tabela 2**.

**Tabela 2.** Ensaios de caracterização física e as normas de referência

Ensaio	Norma
Penetração	DNIT 155 e ASTM D5
Ponto de Amolecimento	DNIT 131 e ASTM D36
Ponto de Fulgor e Combustão	NBR 11341 e ASTM D92

#### 4.3.1 Penetração

O ensaio de penetração tem por objetivo avaliar empiricamente a consistência do ligante asfáltico. As especificações brasileiras utilizam, desde julho de 2005, o ensaio de penetração a 25 °C para classificação do CAP.

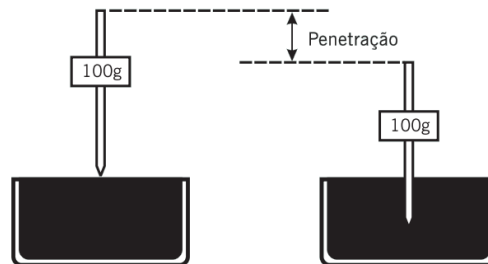
O ensaio consiste em realizar a penetração de uma agulha com massa padronizada em uma amostra de ligante asfáltico com temperatura controlada durante um intervalo de tempo e medir a profundidade de penetração em décimos de milímetro. Quanto menor for a penetração da agulha sobre a amostra asfáltica, mais consistente será o CAP (BERNUCCI et. al, 2008). A **Figura 19** apresenta um esquema com as condições básicas de ensaio. Essas condições podem ser alteradas de acordo com o objetivo do operador.



**Figura 19. Ensaio de Penetração**

As condições normais de ensaio são:

- Carga: 100 gramas
- Tempo: 5 segundos
- Temperatura: 25°C



Fonte: Bernucci et al. (2008) (adaptado)

O ensaio foi realizado de acordo com a norma DNIT 155 e a ASTM D5, sendo as seguintes condições utilizadas para realização do ensaio: temperatura da água do banho em 25 °C, tempo de carregamento 5 s e peso do conjunto com a agulha de 100 g.

O CAP foi aquecido até a fluidez em estufa programada para temperatura de 135 °C. A seguir, o ligante amolecido foi derramado até a borda na capsula de ensaio, também previamente aquecida. A amostra foi deixada em repouso em temperatura ambiente por 60 min. Após resfriar, a capsula foi colocada em uma cuba com água e transferida a um banho com água à temperatura de 25 °C por mais 60 min. A cuba com a amostra foi então retirada do banho e posicionada sob a agulha do penetrômetro, de forma que a superfície do ligante refletisse a ponta da agulha sem penetrar no material. O ensaio foi iniciado soltando o peso do conjunto de forma que a agulha penetrasse no ligante por 5 s. Foram registradas três medições e a média calculada foi designada como o valor da penetração da amostra.

**Figura 20.** Aparelhagem para o ensaio de penetração

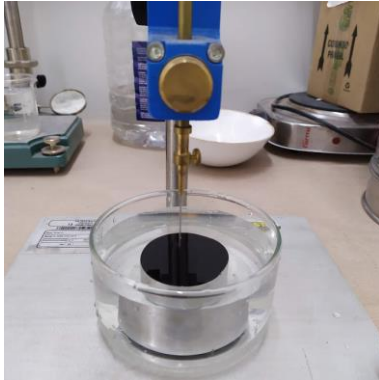
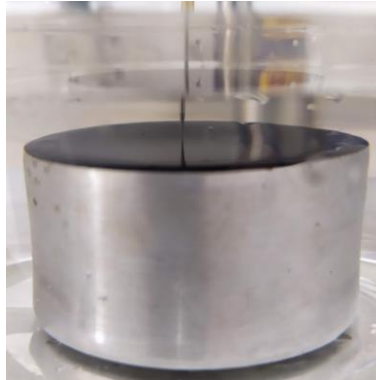


**Figura 21.** Penetrômetro



**Figura 22.** Capsula com a amostra de ligante

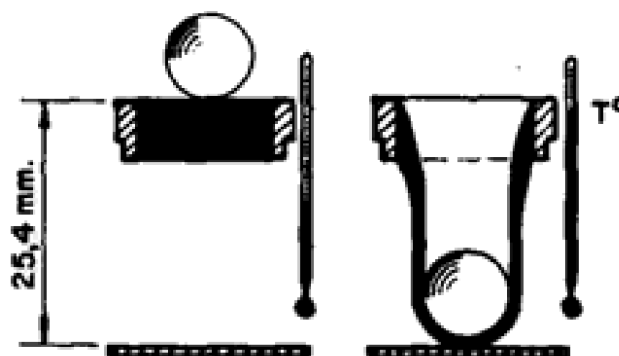


**Figura 23.** Posicionamento da cuba de transferência**Figura 24.** Posicionamento da agulha**Figura 25.** Realização da leitura

### 4.3.2 Ponto de amolecimento

O CAP é um material viscoelástico sem ponto de fusão definido, que amolece e se torna menos viscoso com o aumento da temperatura (ASTM, 2014). O ensaio de ponto de amolecimento, também conhecido como método do anel e bola, tem por objetivo fornecer uma medida empírica da temperatura na qual o ligante amolece e atinge uma determinada condição de escoamento e é usado em conjunto com a penetração para determinar a susceptibilidade térmica do CAP (BERNUCCI et al., 2008).

O ensaio consiste em posicionar uma bola de aço sobre uma amostra de ligante confinada dentro de um anel metálico. O conjunto é inserido dentro de um béquer com água e é aquecido até o ligante amolecer e não conseguir mais suportar o peso da bola. Assim, a bola e o ligante deslocam-se em direção ao fundo do béquer, sendo o ponto de amolecimento definido como a temperatura na qual a bola de aço com a mistura amolecida toca a placa no fundo do conjunto (BERNUCCI et al., 2008; ROBERTS et al., 1996). A **Figura 26** apresenta um esquema ilustrativo do ensaio.

**Figura 26.** Ponto de Amolecimento

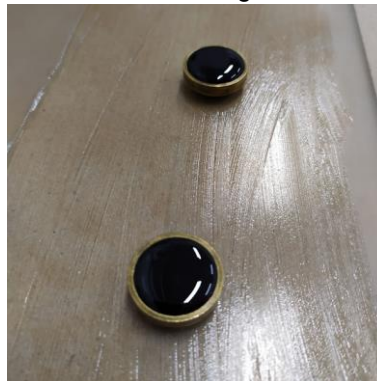
Fonte: Blázquez e García (2000b) (Adaptado)

O ensaio foi realizado de acordo com as normas DNIT 131 e ASTM D36. Uma placa de vidro foi preparada com uma camada de glicerina para diminuir a adesão do ligante à placa. O CAP foi aquecido em estufa a 135 °C até a fluidez sendo então derramado nos anéis metálicos, também previamente aquecidos e posicionados sobre a placa com glicerina, até formar um pequeno excesso de ligante, mas sem transbordar. Os anéis foram deixados resfriar em temperatura ambiente por 30 min. Durante esse período, a aparelhagem com o suporte para os anéis foi montada em um béquer com 105 mm de água e as bolas de aço foram inseridas no fundo do béquer. Após o resfriamento dos anéis com ligante, o excesso de ligante foi raspado com uma espátula aquecida e os anéis foram posicionados no suporte dentro do béquer. O conjunto foi levado a um banho d'água a 5 °C durante 15 min. Ao sair do banho, as bolas de aço foram posicionadas nas guias sobre os anéis e o béquer foi submetido a uma taxa de aquecimento de 5 °C/min até que o ligante não aguentasse mais o peso das bolas de aço e começasse a escoar. O ponto de amolecimento foi a média das temperaturas na qual cada uma das bolas de aço com ligante toca a placa no fundo do conjunto.

**Figura 27.** Aparelhagem para o ensaio de anel e bola



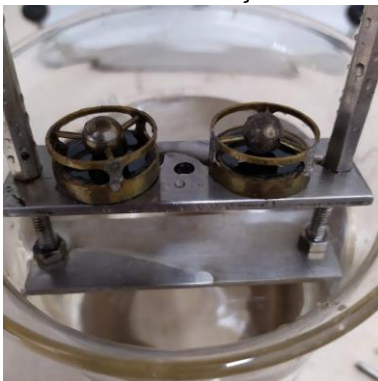
**Figura 28.** Anéis com a amostra de ligante



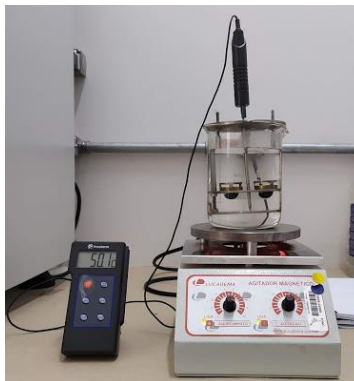
**Figura 29.** Raspagem do excesso



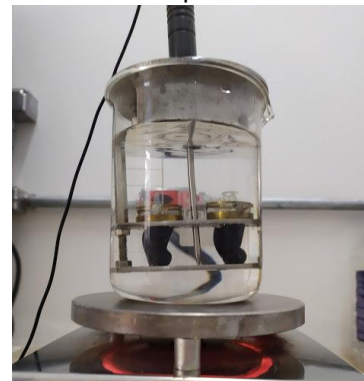
**Figura 30.** Posicionamento das bolas de aço



**Figura 31.** Execução do ensaio



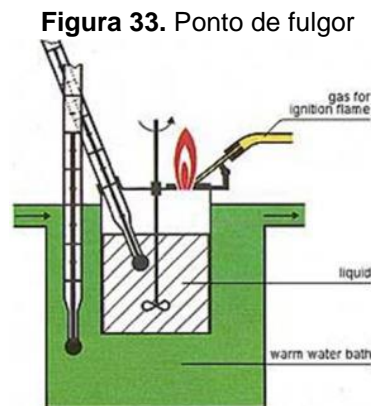
**Figura 32.** Momento em que o CAP toca a placa inferior



### 4.3.3 Ponto de fulgor

O ensaio de ponto de fulgor e combustão tem por objetivo identificar a menor temperatura na qual ocorre inflamação dos gases emanados pelo ligante ao entrar em contato com uma chama padronizada. O ponto de fulgor é a temperatura na qual há a ignição dos vapores e o ponto de combustão ocorre quando há a sustentação da queima por mais de 5 s. Este ensaio relaciona-se com a segurança no manuseio do asfalto durante o transporte, estocagem e usinagem.

O procedimento de ensaio consiste em aquecer o ligante asfáltico a uma taxa controlada e realizar a passagem de uma chama padronizada sobre a superfície da amostra, em intervalos periódicos, até a identificação da ignição dos vapores provenientes do aquecimento. A **Figura 33** mostra um esquema ilustrativo do ensaio.



Fonte: Flash... (2013)

O ensaio foi realizado de acordo com as normas NBR 11314 e ASTM D92. O ligante foi aquecido até a fluidez em estufa a 135 °C sendo então despejado na cuba de ensaio, também previamente aquecida, até a linha de referência. A cuba foi posicionada no aquecedor e o termômetro foi inserido na amostra. Foi configurada uma taxa de aquecimento de aproximadamente 5 a 6 °C/min. Em seguida, iniciou-se a passagem da chama padronizada sobre a amostra em temperaturas múltiplas de 2 °C até a ignição dos vapores emanados pelo ligante. O ensaio foi encerrado após a identificação do ponto de fulgor.

**Figura 34.** Equipamento para o ponto de fulgor



**Figura 35.** Cuba com a amostra



**Figura 36.** Posicionamento do termômetro



**Figura 37.** Passagem da chama de ensaio



**Figura 38.** Gases sendo emanados



**Figura 39.** Identificação do ponto de fulgor



#### 4.4 Caracterização reológica

O estudo da reologia do ligante asfáltico objetiva entender a relação entre a tensão imposta e a deformação resultante para uma ampla faixa de temperaturas e tempos de aplicação de carga, permitindo a determinação do grau de desempenho do CAP.

Em 1987 os Estados Unidos criaram o Strategic Highway Research Program (SHRP) com a finalidade de desenvolver estudos para melhorar o desempenho, a durabilidade e a segurança das estradas. O programa desenvolveu novos métodos de avaliação dos ligantes asfálticos com foco nas propriedades reológicas. Essas especificações ficaram conhecidas como Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave) (BERNUCCI et al., 2008).

Os ensaios realizados para fazer a caracterização reológica das amostras e as normas usadas como referência são apresentados na **Tabela 3**.

**Tabela 3.** Ensaios de caracterização reológica e as normas de referência

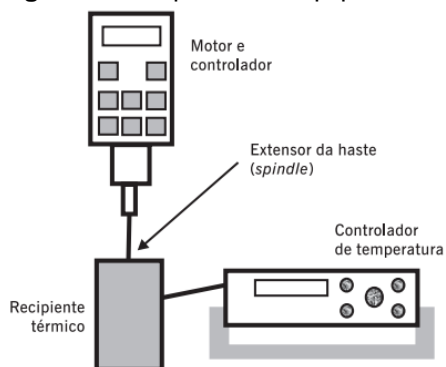
Ensaio	Norma
Viscosidade rotacional Brookfield	AASHTO T316 e ASTM D4402
Reômetro de cisalhamento dinâmico	AASHTO T315 e ASTM D7175

#### 4.4.1 Viscosidade rotacional Brookfield

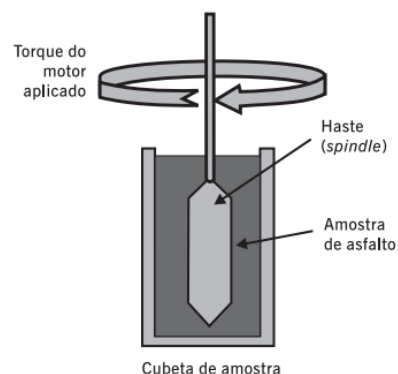
A viscosidade é uma medida de resistência ao escoamento. O ensaio de viscosidade rotacional Brookfield permite determinar a viscosidade aparente do ligante asfáltico e avaliar a sua trabalhabilidade para posterior bombeamento e mistura com os agregados.

O viscosímetro rotacional Brookfield mede o torque requerido para manter constante a velocidade de rotação de uma haste imersa em uma amostra de ligante asfáltico e em temperatura constante. O torque é convertido para viscosidade pela razão entre a tensão e a taxa de cisalhamento (ROBERTS et al., 1996).

A **Figura 40** e a **Figura 41** apresentam o esquema de funcionamento do equipamento e do spindle (haste).

**Figura 40.** Esquema do equipamento\*

Fonte: Bernucci et al. (2008)

**Figura 41.** Esquema do spindle

O procedimento de ensaio foi realizado tendo como referência as normas AASHTO T316 e ASTM D4402. As condições de ensaio foram obtidas nas normas de especificação DNIT 095 e DNIT 129 (**Tabela 4**).

**Tabela 4.** Condições de ensaio

Haste (Spindle)	Temperatura (°C)	Velocidade de rotação (rpm)
21	135	20
21	150	50
21	177	100

Fonte: DNIT (2006); DNIT (2011)

O ligante foi colocado na estufa para aquecimento à temperatura de 135 °C. A haste (spindle) e a capsula de ensaio foram previamente aquecidas. Quando suficientemente fluido para ser transferido, 8 g de ligante foram pesados dentro da capsula de ensaio. A amostra foi posicionada dentro do recipiente térmico do viscosímetro e o spindle foi imerso no ligante até o cobrimento completo de sua parte cônica superior.

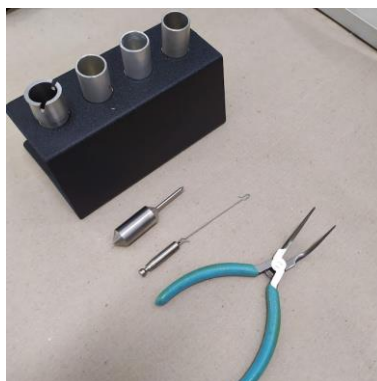
O viscosímetro pode ser controlado externamente por meio de um software instalado em um computador. Foi realizada a programação de todas as etapas de ensaio e o equipamento realizou todo o processo automaticamente.

A primeira etapa foi realizada na temperatura de 135 °C. O conjunto com a amostra e o spindle foram mantidos em repouso nessa temperatura por 30 min, na sequência o motor iniciou a rotação com velocidade de 20 rpm por mais 10 min e em seguida foram realizadas 3 leituras em intervalos de 1 min cada. A média das leituras foi o valor da viscosidade em 135 °C. Todo o processo foi repetido automaticamente para 150 °C e 50 rpm e 177 °C e 100 rpm.

**Figura 42.** Viscosímetro rotacional brookfield

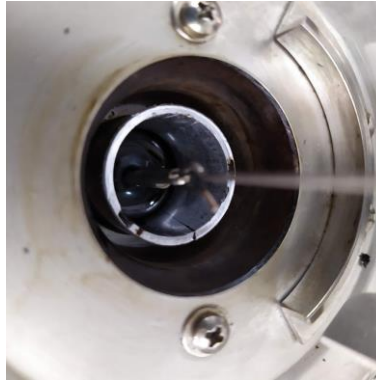


**Figura 43.** Aparelhagem



**Figura 44.** Posicionamento da capsula no recipiente térmico



**Figura 45.** Posicionamento do spindle no recipiente térmico**Figura 46.** Spindle submerso na amostra**Figura 47.** Execução do ensaio

#### 4.4.2 Reômetro de cisalhamento dinâmico

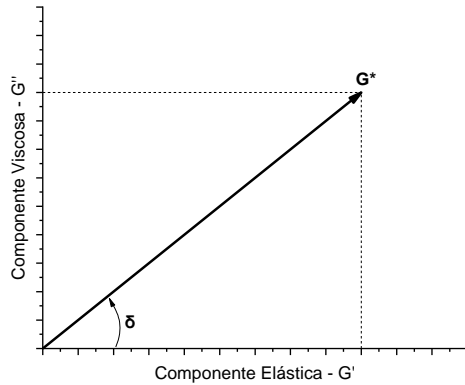
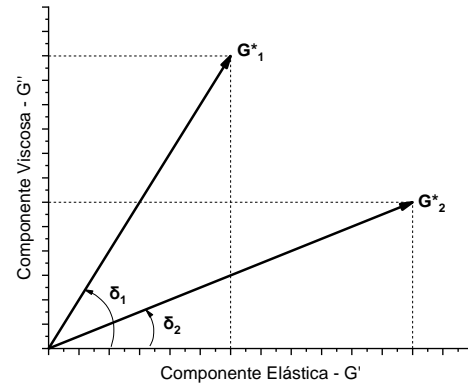
O reômetro de cisalhamento dinâmico (Dynamic Shear Rheometer, DSR) permite caracterizar o comportamento viscoelástico do ligante asfáltico em diferentes temperaturas a partir da medição do módulo complexo ( $G^*$ ) e do ângulo de fase ( $\delta$ ). O módulo complexo representa a resistência total à deformação sob repetição de carregamento e o ângulo de fase representa a relação entre o comportamento viscoso e o comportamento elástico (ROBERTS et al., 1996).

Na **Figura 48** pode ser observado que o módulo complexo possui duas componentes, a componente viscosa, denominada módulo de dissipação ( $G''$ ) e a componente elástica, denominada módulo de armazenamento ( $G'$ ). As duas componentes estão relacionadas ao módulo complexo por meio do ângulo de fase. A **Figura 49** apresenta o comportamento de dois ligantes com o mesmo módulo complexo, porém com ângulos de fase diferentes. Quando submetidos a carregamento, o segundo ligante sofrerá maior deformação elástica (recuperável), enquanto o primeiro ligante sofrerá maior deformação viscosa (permanente), ou seja, quanto menor o ângulo de fase, maior a elasticidade do ligante e sua capacidade de recuperar as deformações sofridas (ROBERTS et al., 1996). Como se trata de um vetor, as componentes de  $G^*$  podem ser obtidas a partir das seguintes equações:

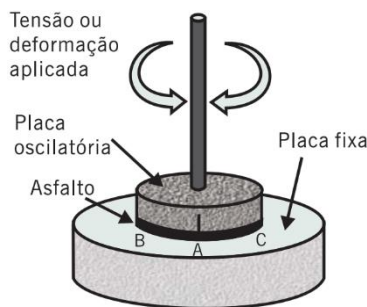
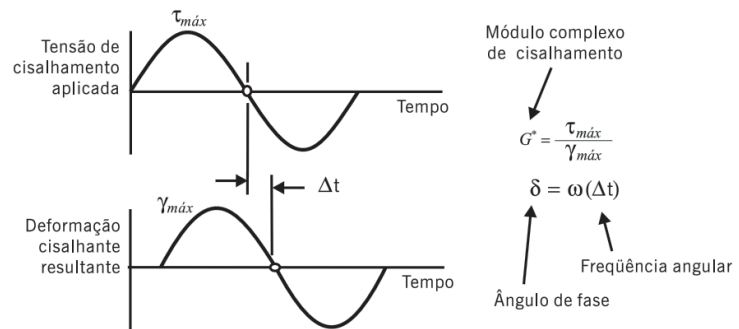
$$G' = G^* \cdot \cos(\delta) \quad \text{Equação 3}$$

$$G'' = G^* \cdot \sen(\delta) \quad \text{Equação 4}$$



**Figura 48.** Componentes do Módulo Complexo  $G^*$ **Figura 49.** Comportamento viscoelástico do CAP

O princípio de funcionamento do DSR consiste na aplicação de tensões cisalhantes oscilatórias em uma amostra de ligante posicionada entre duas placas metálicas, sendo uma fixa e outra giratória, e medir a deformação resultante. O módulo complexo é calculado a partir da razão entre tensão e deformação, enquanto o ângulo de fase é o produto entre a frequência de oscilação e o intervalo de tempo, ou seja, a defasagem entre a tensão aplicada e a resposta à deformação (**Figura 50 e Figura 51**) (BERNUCCI et al., 2008).

**Figura 50.** Esquema das placas**Figura 51.** Defasagem entre a tensão e a deformação

Fonte: Bernucci et al. (2008) (adaptado)

#### 4.4.2.1 Parâmetro de resistência à deformação permanente ( $G^*/\sin\delta$ )

Os pesquisadores do SHRP consideram a deformação permanente como um fenômeno de carregamento cíclico sob tensão controlada. Durante cada ciclo de carregamento, trabalho é realizado para deformar a superfície do pavimento. Parte desse trabalho é recuperado pela recuperação elástica do pavimento e parte é dissipada em forma de deformação permanente e calor. Para diminuir a deformação permanente, o trabalho dissipado durante cada ciclo de carregamento deve ser minimizado. Matematicamente o

trabalho dissipado por ciclo de carregamento sob tensão constante pode ser expressado da seguinte forma (ROBERTS et al., 1996):

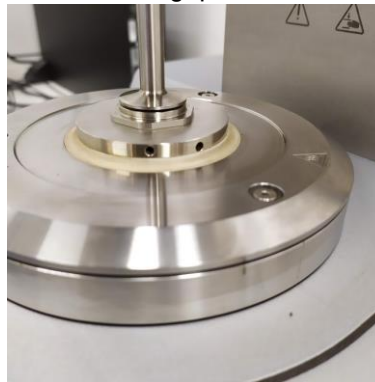
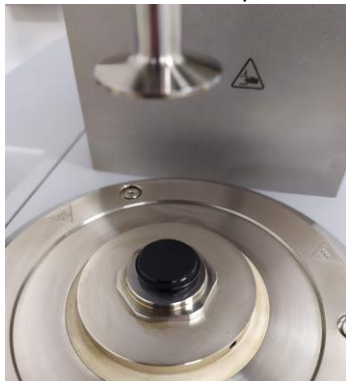
$$W_c = \pi \sigma_o^2 \left[ \frac{1}{G^*/\sin(\delta)} \right] \quad \text{Equação 5}$$

onde  $W_c$  é o trabalho dissipado,  $\sigma_o$  é a tensão aplicada durante o ciclo de carregamento,  $G^*$  é o módulo complexo e  $\delta$  é o ângulo de fase. O trabalho dissipado por ciclo de carregamento é inversamente proporcional ao parâmetro  $G^*/\sin(\delta)$  e pode ser reduzido tanto pelo aumento do módulo complexo ( $G^*$ ) quanto pela redução do ângulo de fase ( $\delta$ ). O aumento do módulo complexo aumenta a rigidez do ligante e o torna mais resistente à deformação, enquanto a diminuição do ângulo de fase torna o CAP mais elástico e aumenta a sua capacidade de recuperar as deformações sofridas. Dessa forma, a especificação Superpave usa o parâmetro  $G^*/\sin(\delta)$  como um indicador da resistência do ligante à deformação permanente (ROBERTS et al., 1996).

Para avaliar a resistência do CAP à deformação permanente, o ligante deve ser testado no DSR em sua condição original e envelhecida no curto prazo (RTFOT) e em altas temperaturas (entre 40 e 88 °C). O valor mínimo do parâmetro  $G^*/\sin(\delta)$ , especificado na AASHTO M320, para o ligante não envelhecido é de 1,0 kPa e para o ligante envelhecido no curto prazo é de 2,2 kPa. Neste caso o ensaio deve ser realizado com placas de 25 mm de diâmetro e separadas por 1 mm entre si.

O ensaio foi realizado tendo como referência as normas AASTHO T315 e ASTM D7175. O DSR foi configurado com a temperatura inicial de ensaio de 40 °C e separação de 1 mm entre as placas. O CAP foi aquecido até a fluidez em uma estufa com temperatura programada para 135 °C e depois foi despejado em um molde de silicone com diâmetro interno de 25 mm até o material formar uma superfície convexa. Após resfriar em temperatura ambiente, o disco de ligante foi posicionado entre as placas de 25 mm do DSR. O equipamento fez descer a placa superior sobre a amostra e comprimiu o ligante até que a distância entre as placas fosse de 1 mm. O excesso de material foi raspado e o ensaio foi iniciado.

O equipamento realizou o ensaio automaticamente, fazendo o controle da temperatura e aplicando as tensões cisalhantes a cada 6 °C com 10 minutos de estabilização da temperatura e realização das leituras. Todos os resultados foram gerados automaticamente.

**Figura 52.** Reômetro de cisalhamento dinâmico**Figura 53.** Aparelhagem**Figura 54.** Encaixe da placa superior**Figura 55.** Montagem da placa inferior**Figura 56.** Definição do "zero gap"**Figura 57.** Molde de 25 mm**Figura 58.** Posicionamento da amostra entre as placas**Figura 59.** Aproximação das placas**Figura 60.** Remoção do excesso de ligante

#### 4.4.2.2 Parâmetro de resistência ao trincamento por fadiga ( $G^* \cdot \sin \delta$ )

O trincamento por fadiga devido ao tráfego de veículos é o defeito predominante nas temperaturas intermediárias (FAXINA, 2006). O trincamento por fadiga pode ser considerado um fenômeno de tensão controlada em camadas mais grossas de pavimento ou de deformação controlada em camadas mais finas. Por ser predominante em pavimentos mais

finos, os pesquisadores do SHRP assumiram o trincamento por fadiga como um fenômeno de deformação controlada. Matematicamente o trabalho dissipado por ciclo de carregamento com deformação constante pode ser calculado com a equação seguinte (ROBERTS et al., 1996):

$$W_c = \pi \epsilon_o^2 [G^* \sin(\delta)] \quad \text{Equação 6}$$

onde  $W_c$  é o trabalho dissipado,  $\epsilon$  é a deformação,  $G^*$  é o módulo complexo e  $\delta$  é o ângulo de fase. A equação indica que quanto maior o módulo complexo e/ou o ângulo de fase, mais trabalho será dissipado por ciclo de carregamento. Ligantes com menores ângulos de fase possuem maior elasticidade e podem se deformar sem acumular tensões elevadas, retornando ao estado original após serem deformados. O trabalho pode ser dissipado de diversas maneiras: calor, deformação plástica, trincas ou propagação de trincas. Quanto menor o trabalho dissipado por ciclo menor a possibilidade de ocorrer trincamento por fadiga ou qualquer outro dano ao pavimento. Por isso, as especificações Superpave definiram um limite para o parâmetro  $G^* \cdot \sin(\delta)$  como forma de diminuir a dissipação de energia e prevenir o trincamento por fadiga (ROBERTS et al., 1996).

Conforme o ligante envelhece em serviço, ele se torna cada vez mais rígido e suscetível ao trincamento por repetição de carregamento, dessa forma, na avaliação da resistência do CAP ao trincamento por fadiga, são testadas amostras de ligante envelhecidas no longo prazo (PAV) com a finalidade de simular a condição mais crítica possível. As amostras são testadas em temperaturas intermediárias (entre 1 e 40 °C) e o valor máximo admissível do parâmetro  $G^* \cdot \sin(\delta)$  é de 5000 kPa. O ensaio é realizado com placas de 8 mm de diâmetro e separadas por 2 mm entre si.

O procedimento de ensaio foi realizado da mesma maneira como descrito anteriormente para avaliação da resistência à deformação permanente. Porém, para avaliar a resistência ao trincamento por fadiga o DSR diminui a temperatura em 3 °C a cada 10 minutos de estabilização e realização das leituras ao invés de aumentá-las.

#### 4.4.3 Grau de desempenho

O grau de desempenho (Performance Grade, PG) faz parte do sistema Superpave e define uma série de critérios para compra e venda de ligantes asfálticos que são especificados na AASTHO M320 (Standart specifications for performance graded asphalt binder). Essa norma determina as propriedades físicas e reológicas que devem ser satisfeitas pelo material

em certas condições climáticas e de envelhecimento. Os testes necessários, a metodologia e os equipamentos para determinação do grau de performance de um ligante asfáltico estão descritos na norma AASHTO R29 (Grading or verifying the performance grade (PG) of an asphalt binder).

O grau de desempenho do ligante asfáltico é representado com as siglas PG, seguida por dois números, por exemplo, PG 64-28. O primeiro representa o PG em alta temperatura e é a temperatura mais elevada durante os sete dias consecutivos mais quentes do ano. O segundo número, incluindo o sinal negativo, indica o PG em baixa temperatura e é a menor temperatura do dia mais frio do ano que atua no mesmo ponto do pavimento (BERNUCCI et al., 2008).

O DSR é utilizado para determinação do grau de desempenho para alta temperatura. O ensaio deve ser realizado com a amostra de ligante não envelhecida e posteriormente com a amostra de ligante envelhecida no curto prazo (RTFOT). A máxima temperatura de ensaio que ambas as amostras satisfazem os valores mínimos determinados para o parâmetro de resistência à deformação permanente ( $G^*/\sin(\delta)$ ), $\text{mín} > 1,0$  kPa para amostras não envelhecidas e  $G^*/\sin(\delta)$ , $\text{mín} > 2,2$  kPa para amostras envelhecidas no RTFOT) é o grau de desempenho em alta temperatura (AASHTO, 2012).

Para determinação do grau de desempenho em baixa temperatura é necessária a utilização do reômetro de fluência em viga (Bending Beam Rheometer, BBR) ou o equipamento de ensaio de tração direta (Direct Tension, DT). Os ensaios devem ser realizados com amostras envelhecidas no longo prazo (PAV) e temperatura inicial de ensaio do BBR ou do DT é definida na AASHTO M320 com base no resultado do DSR para avaliação do parâmetro de resistência ao trincamento por fadiga. Utiliza-se inicialmente a menor temperatura de ensaio que o parâmetro  $G^*.\sin(\delta)$  apresentou valor menor do que 5000 kPa (AASHTO, 2012).

A menor temperatura de ensaio no BBR que satisfaz os parâmetros de módulo de relaxação (valor-m) e rigidez estática (S) representa o grau de desempenho para baixa temperatura (valor-m, $\text{mín} > 0,3$  e S, $\text{máx} < 300$  MPa). Se o valor-m  $> 0,3$  e  $300 < S < 600$  MPa é necessária a realização do ensaio de tração direta. Para este ensaio o grau de desempenho em baixa temperatura é a menor temperatura na qual a tensão de falha ( $\epsilon$ ) é satisfeita ( $\epsilon$ , $\text{mín} > 1,0\%$ ). Para ambos os ensaios a temperatura deve ser decrescida a cada 6 °C a partir da temperatura inicial e o ensaio deve ser repetido até que todas as condições sejam satisfeitas (AASHTO, 2012).

## 4.5 Caracterização da durabilidade

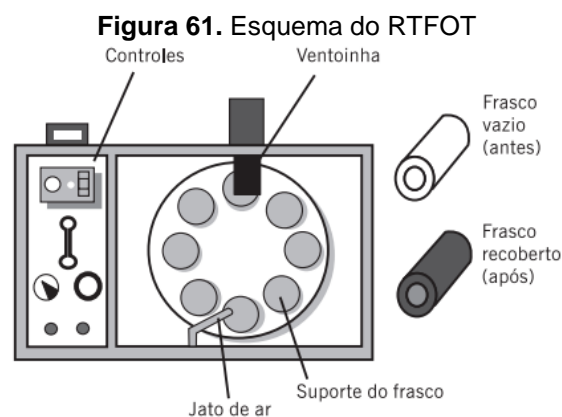
O envelhecimento altera as propriedades físicas e reológicas do ligante asfáltico, fazendo com que se torne mais rígido e quebradiço. O CAP envelhece rapidamente devido ao seu aquecimento durante a usinagem da mistura asfáltica e posterior espalhamento e compactação na via, sendo esse envelhecimento chamado de envelhecimento de curto prazo. O envelhecimento de longo prazo ocorre lentamente no pavimento durante a sua vida em serviço. Os ensaios realizados para simular os efeitos do envelhecimento de curto e de longo prazo e as normas de referência são apresentados na **Tabela 5**.

**Tabela 5.** Ensaios de caracterização da durabilidade e as normas de referência

Ensaio	Norma
Envelhecimento de curto prazo (RTFOT)	AASHTO T240 e ASTM D2872
Envelhecimento de longo prazo (PAV)	AASHTO R28 e ASTM D6521

### 4.5.1 Envelhecimento de curto prazo

O ensaio de envelhecimento de curto prazo é realizado na estufa de filme rotativo ou Rolling Thin-Film Oven Test (RTFOT). Essa estufa permite simular o envelhecimento que o ligante asfáltico experimenta durante a fabricação da mistura asfáltica e posterior espalhamento e compactação na via. O ensaio fornece também uma medida quantitativa da perda de voláteis durante o processo. O envelhecimento é causado por vários mecanismos, porém os mais relevantes são a evaporação (perda dos componentes voláteis) e a oxidação (reação química dos elementos que compõem o ligante asfáltico com o oxigênio). Um esquema do ensaio é apresentado na **Figura 61**.



Fonte: Bernucci et al. (2008)

O ensaio consiste em submeter o ligante à elevadas temperaturas e jatos de ar. As amostras são rotacionadas pelo equipamento e novas porções do ligante são constantemente expostas aos efeitos do calor e do ar. A estufa permite o ensaio de 8 recipientes com 35 g de ligante cada. As amostras são continuamente rotacionadas a uma temperatura de 163°C e submetidas a um fluxo de ar de 4000 ml/min durante 85 minutos (BERNUCCI et al., 2008).

As normas de referência usadas para realização do ensaio foram a AASHTO T240 e a ASTM 2872. A estufa foi pré-aquecida até a temperatura de 163 °C, assim como os recipientes de ensaio. O ligante foi aquecido em outra estufa à temperatura de 135 °C até a fluidez e depois foram despejadas 35 g em cada frasco de ensaio. Após a pesagem, cada recipiente foi imediatamente posto na posição horizontal e rolado até que o ligante cobrisse a superfície lateral interna. Os recipientes foram deixados em repouso por 60 minutos para resfriarem em temperatura ambiente. Dois recipientes foram marcados e pesados para determinação da variação em massa após o ensaio.

Transcorrido o tempo de resfriamento, os recipientes foram posicionados no suporte dentro da estufa, sendo esse procedimento realizado o mais rápido possível para evitar queda brusca da temperatura. A porta foi fechada e o fluxo de ar e a rotação do suporte dos frascos foram iniciados.

Depois de 85 minutos de ensaio, os frascos foram retirados da estufa um a um e o ligante envelhecido foi sendo transferido para outro recipiente. Os dois frascos marcados foram pesados novamente para o cálculo da variação em massa e as amostras envelhecidas foram submetidas novamente aos ensaios físicos e reológicos.

**Figura 62.** Estufa (RTFOT)

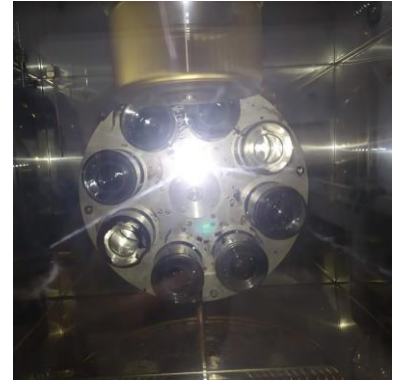


**Figura 63.** Recipiente vazio



**Figura 64.** Pesagem das amostras



**Figura 65.** Rolagem do recipiente**Figura 66.** Resfriamento das amostras**Figura 67.** Execução do ensaio

#### 4.5.2 Envelhecimento de longo prazo

O vaso aberto sob pressão (Pressure Aging Vessel, PAV) é um equipamento que simula o envelhecimento de longo prazo sofrido pelo CAP durante sua vida em serviço (aproximadamente 10 anos). É uma etapa importante para determinar os efeitos do envelhecimento e o grau de desempenho do ligante asfáltico. As amostras envelhecidas no PAV são testadas no ensaio de fluência em viga (Bending Beam Rheometer, BBR) e no ensaio de tração direta (Direct Tension, DT) para avaliação da resistência do CAP ao trincamento térmico e no reômetro de cisalhamento dinâmico (Dynamic Shear Rheometer, DSR) para avaliar a resistência ao trincamento por fadiga. Primeiro as amostras são envelhecidas na estufa RTFOT para depois serem envelhecidas no PAV. O equipamento permite o ensaio de até 10 recipientes com 50 g de ligante cada, as amostras são envelhecidas por 20 horas sob uma pressão de 2,1 MPa. A temperatura de envelhecimento é selecionada de acordo com o tipo de CAP. Em seguida, as amostras são colocadas em um forno a vácuo para retirada das bolhas de ar (BERNUCCI et al., 2008). A **Figura 68** mostra um esquema do equipamento.

**Figura 68.** Esquema do PAV

Fonte: Bernucci et al. (2008)



As normas de referência usadas para realização do ensaio foram a AASHTO R28 e ASTM D6521. O PAV foi pré-aquecido a 85 °C de acordo com as configurações do software de controle do equipamento. As bandejas metálicas e o suporte também foram levados a um aquecimento prévio. Após passar pelo RTFOT, 50 g do CAP envelhecido no curto prazo foram despejados em cada recipiente de ensaio. Os recipientes foram colocados no suporte das bandejas e inseridos dentro do PAV o mais rápido possível para evitar queda brusca de temperatura. O equipamento foi fechado e o ensaio foi iniciado. A temperatura configurada foi de 100 °C (para condições climáticas moderadas, PG 58 ou acima) e a pressão de 2,10 MPa.

Após as 20 horas de ensaio, o equipamento inicia a depressurização automaticamente. As amostras foram retiradas e colocadas em estufa a 163 °C por 15 min para diminuir a viscosidade do ligante envelhecido e facilitar a sua transferência. O conteúdo das bandejas foi despejado em outro recipiente e posicionado dentro do forno a vácuo (previamente aquecido em 170 °C) para retirada das bolhas de ar. As amostras foram mantidas nessa temperatura sem aplicação de vácuo por 10 minutos. Posteriormente, a pressão foi rapidamente reduzida para 15 kPa e as amostras ficaram mais 30 minutos dentro do forno a vácuo em 170 °C para remoção das bolhas de ar. Após esse processo, os ensaios físicos e reológicos foram repetidos para avaliação dos efeitos do envelhecimento de longo prazo nas propriedades do CAP.

**Figura 69.** PAV



**Figura 70.** Suporte das bandejas



**Figura 71.** Bandeja vazia



**Figura 72.** Pesagem da amostra



**Figura 73.** Posicionamento dentro do PAV



**Figura 74.** Amostras dentro do PAV



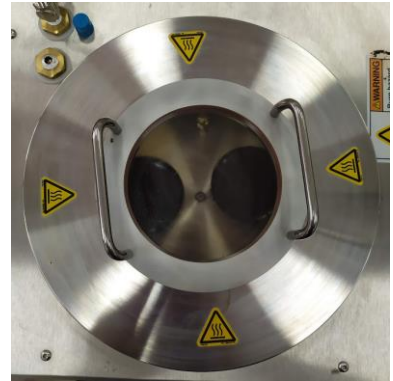
**Figura 75.** Recolhimento do material após ensaio



**Figura 76.** Forno a vácuo



**Figura 77.** Retirada das bolhas de ar



## 5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados quantitativos obtidos por meio dos ensaios de caracterização propostos na metodologia de trabalho, de modo que seja possível verificar as alterações nas propriedades do CAP modificado com cinza, antes e após seu envelhecimento. Também serão apresentadas observações qualitativas obtidas empiricamente no decorrer da execução dos trabalhos a fim de complementar o estudo. Para leitura e interpretação dos resultados gráficos convencionou-se a utilização do termo “50-70” para se referir ao CAP não modificado. Caso seja uma amostra modificada o termo será seguido por “+ X% cinza”. Da mesma forma, para os CAP’s envelhecidos no curto prazo usou-se “RTFOT” e para os envelhecidos no longo prazo usou-se “PAV”.

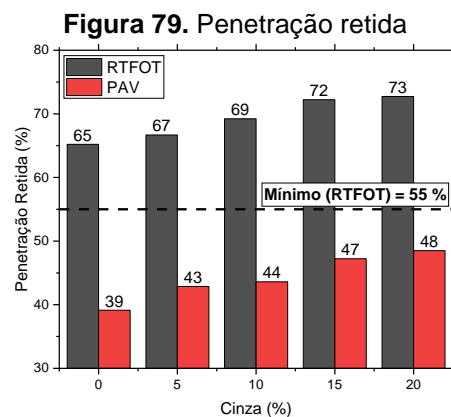
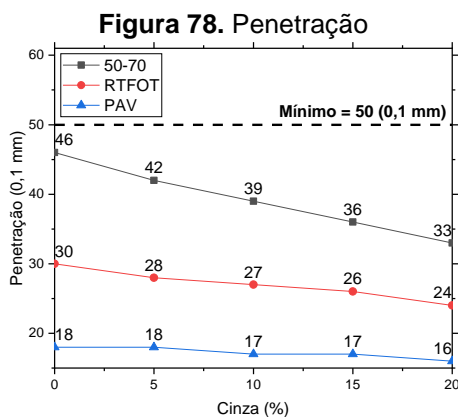
### 5.1 Ligante modificado

A mistura entre a cinza e o CAP se mostrou bem homogênea, não havendo maiores dificuldades no processo de adição ou formação de pelotas de cinza no meio da mistura. No entanto, se observou precipitação de pequena quantidade de cinza no ligante modificado mantido em estufa após determinado período de tempo.

### 5.2 Caracterização física

#### 5.2.1 Penetração

Os resultados dos ensaios de penetração para as amostras envelhecidas e não envelhecidas em função da quantidade percentual de cinza são apresentados na **Figura 78**. A penetração que fica retida após o envelhecimento pode ser visualizada na **Figura 79**.



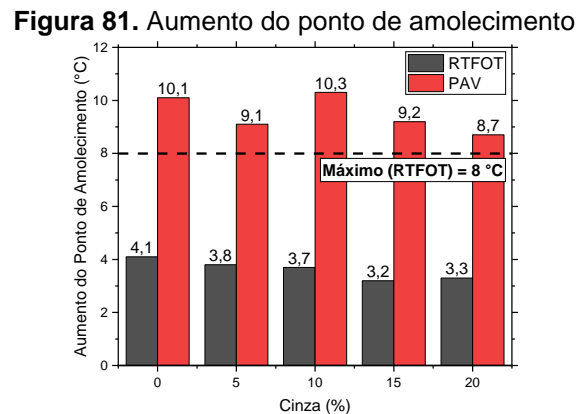
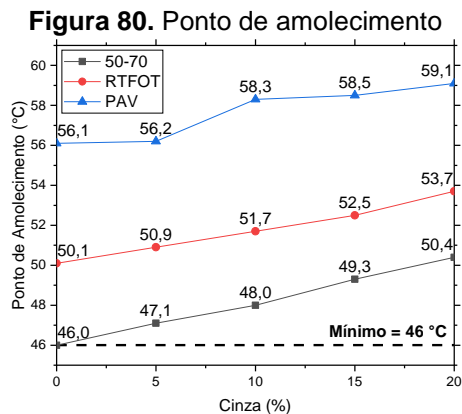
A penetração apresentou a tendência de diminuição com o aumento da quantidade percentual de cinza, tornando o ligante modificado mais consistente que o original.

Considerando o envelhecimento do CAP após RTFOT e após PAV, é possível observar uma diminuição considerável da penetração, fazendo aumentar ainda mais a rigidez do ligante, porém a taxa de diminuição da penetração em função da quantidade percentual de cinza tende a ser menor após o envelhecimento. Esse resultado se confirma através do gráfico de penetração retida, que mostra o incremento desse parâmetro com o aumento da quantidade de cinza.

Todos os valores da penetração retida após o RTFOT ficaram acima do limite mínimo de 55% especificado na norma DNIT 095, porém a penetração do CAP ficou abaixo do valor esperado de 50 a 70 (0,1 mm) para todos os percentuais de cinza, inclusive antes da modificação.

## 5.2.2 Ponto de amolecimento

Os resultados dos ensaios de ponto de amolecimento em função da quantidade percentual de cinza são apresentados na **Figura 80**. A **Figura 81** mostra a magnitude do aumento do ponto de amolecimento com o acréscimo de cinza após o envelhecimento.



O ponto de amolecimento do CAP aumentou com o incremento percentual de cinza adicionada. Os processos de envelhecimento de curto (RTFOT) e longo prazo (PAV) também contribuíram com o aumento do ponto de amolecimento. Esse aumento se traduz em uma maior consistência do ligante modificado, que apresenta maior resistência ao escoamento devido à elevação da temperatura.

A ponto de amolecimento aumentou a uma taxa menor após o envelhecimento, tanto após RTFOT quanto após PAV. Esse resultado pode ser observado pela variação da magnitude do aumento do ponto de amolecimento, que apresentou a tendência de diminuir com a quantidade de cinza.

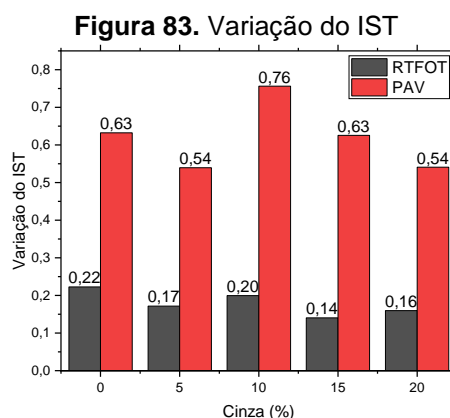
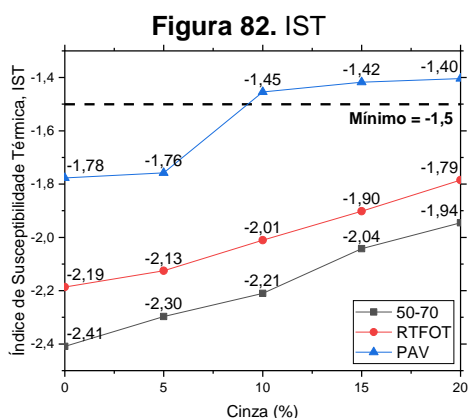
Em todos os casos analisados, o ponto de amolecimento ficou acima do limite mínimo de 46 °C especificado na DNIT 095, enquanto o aumento do ponto de amolecimento após RTFOT ficou abaixo do limite máximo de 8 °C estabelecido na mesma norma.

### 5.2.3 Índice de Susceptibilidade Térmica (IST)

O IST foi calculado a partir dos resultados de penetração e ponto de amolecimento conforme formulação apresentada na norma DNIT 095.

$$IST = \frac{500 \cdot \log(PEN) + 20 \cdot PA - 1951}{120 - 50 \cdot \log(PEN) + PA} \quad \text{Equação 7}$$

onde PEN é a penetração (0,1 mm) e PA é o ponto de amolecimento (°C). Esse parâmetro indica a sensibilidade da consistência do CAP à variação de temperatura. Quanto menor o valor do IST, em valores absolutos, menor será a susceptibilidade térmica do ligante (BERNUCCI et al., 2008). Os resultados do IST em função do percentual de cinza são apresentados na **Figura 82**. A variação do IST após envelhecimento é apresentada na **Figura 83**.



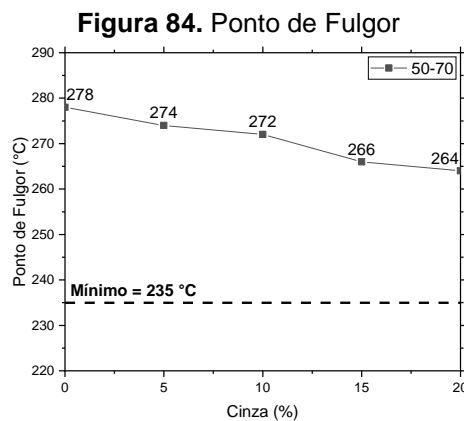
O IST do CAP 50-70 não modificado e não envelhecido está fora dos limites estabelecidos pela norma DNIT 095 (-1,5 a 0,7) e se deve aos baixos valores de penetração

e ponto de amolecimento. Esse resultado indica que o CAP é muito sensível às variações de temperatura e muda sua consistência rapidamente ao ser aquecido.

Após a modificação é possível observar que o IST, em valores absolutos, diminui gradativamente com o aumento da quantidade percentual de cinza, fazendo com que os valores obtidos sigam a tendência de se enquadrar entre os limites estabelecidos na DNIT 095 e mostrando que a cinza contribui com a diminuição da susceptibilidade térmica do CAP.

## 5.2.4 Ponto de fulgor

Os resultados do ponto de fulgor em função da quantidade percentual de cinza adicionada na mistura são apresentados na **Figura 84**.



O ponto de fulgor apresentou tendência de diminuição à medida que aumentava a quantidade percentual de cinza, porém em todos os casos avaliados, a temperatura de ignição ficou acima do limite mínimo de 235 °C especificado na DNIT 095. Esse resultado indica que mesmo com a diminuição do ponto de fulgor, o ligante modificado se mantém seguro para manuseio e aplicação. Contudo, cabe ressaltar que a quantidade de gases emanados aumentou significativamente após a modificação do ligante aliado a forte odor dentro do laboratório, apesar da utilização de exaustor para sucção desses elementos durante o ensaio.

## 5.3 Caracterização reológica

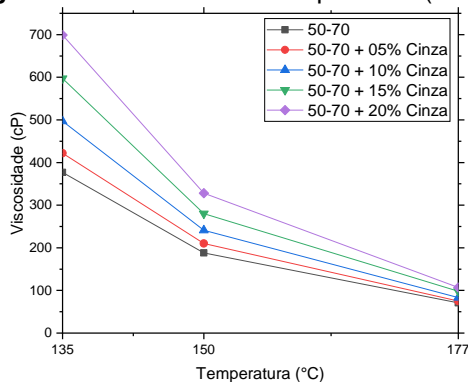
### 5.3.1 Viscosidade rotacional Brookfield

Os valores da viscosidade em função da temperatura para as amostras não envelhecidas (50-70), envelhecidas no curto prazo (RTFOT) e envelhecidas no longo prazo (PAV) são apresentados na **Figura 85**, **Figura 87** e **Figura 89**. A viscosidade de um CAP está

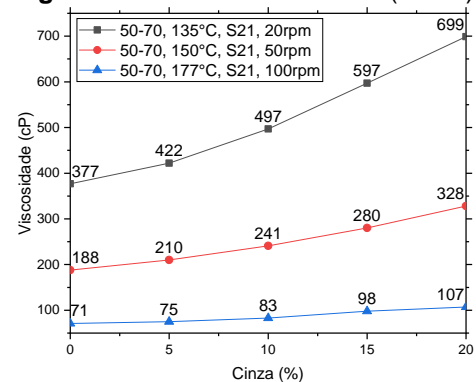
relacionada com sua trabalhabilidade e facilidade de se misturar com os agregados. Uma viscosidade elevada exige maiores temperaturas de usinagem e a mistura asfáltica resultante apresetará maior dificuldade durante a compactação. Essa característica pode ser observada nos gráficos da viscosidade em função da temperatura, onde se verifica que para todas as amostras testadas, antes e após o envelhecimento, a viscosidade tende a diminuir com o aumento da temperatura.

A **Figura 86**, a **Figura 88** e a **Figura 90** mostram a evolução da viscosidade em função do acréscimo de cinza. É possível observar que para todas as temperaturas de ensaio, antes e após o envelhecimento, o aumento da quantidade percentual de cinza faz aumentar a viscosidade do CAP. Esse aumento da viscosidade, proporcionado pela adição de cinza, é maior nas temperaturas mais baixas. Por outro lado, se observa a tendência de convergência das viscosidades dos ligantes modificados com a viscosidade do CAP original em 177 °C. Dessa forma, a taxa de diminuição da viscosidade com o aumento da temperatura é maior após a modificação e evidencia uma maior variabilidade da viscosidade com a temperatura devido ao acréscimo de cinza.

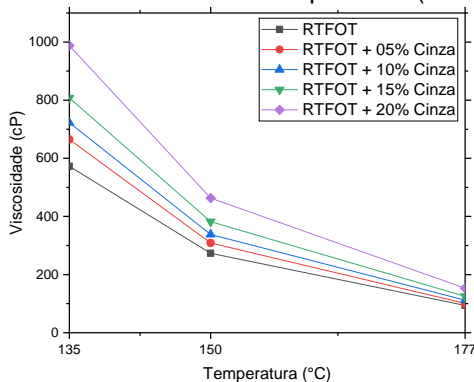
**Figura 85.** Viscosidade x temperatura (50-70)



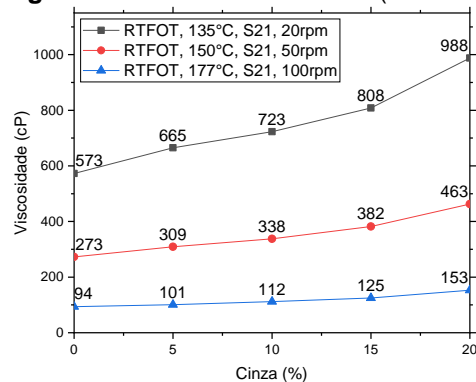
**Figura 86.** Viscosidade x cinza (50-70)

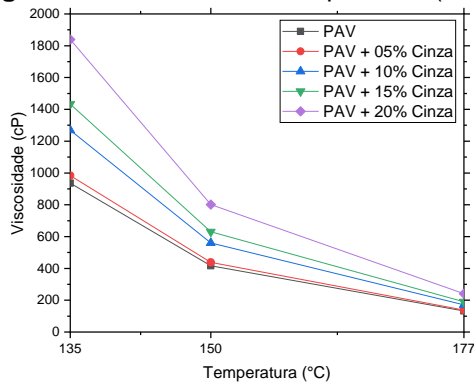
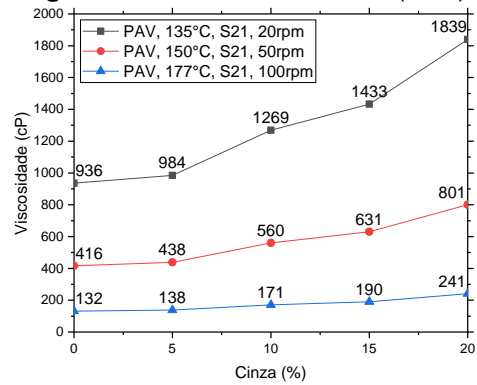


**Figura 87.** Viscosidade x temperatura (RTFOT)

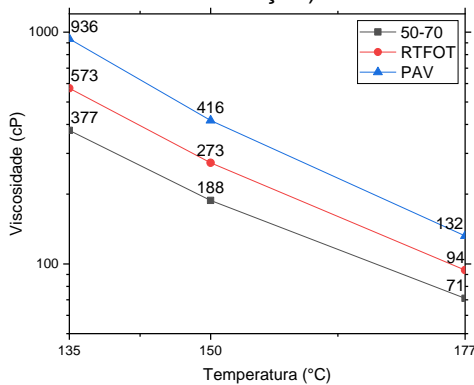
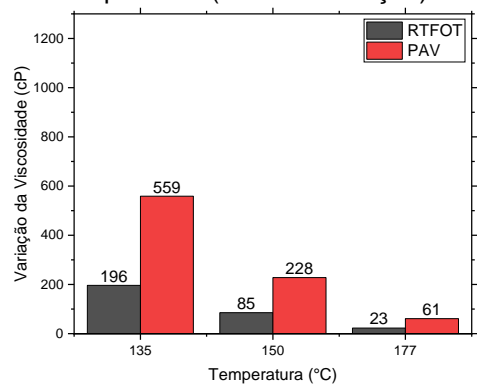


**Figura 88.** Viscosidade x cinza (RTFOT)

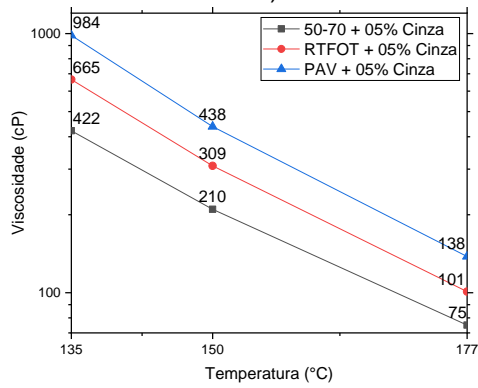
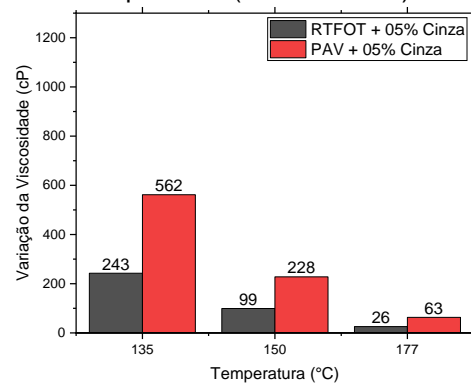
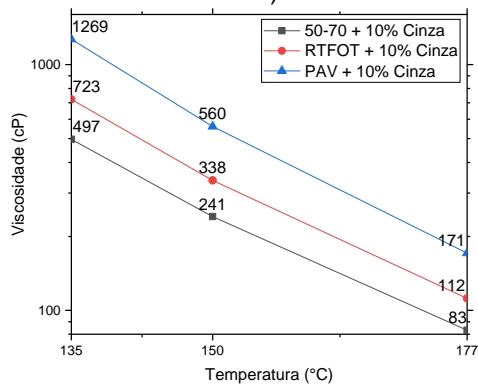
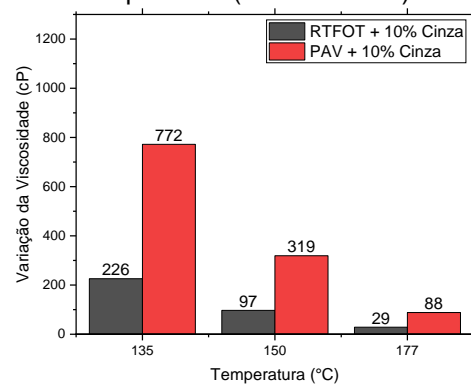
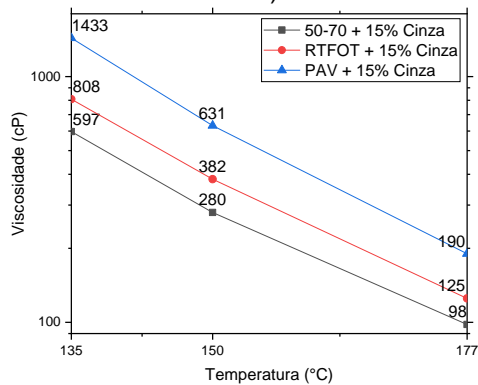
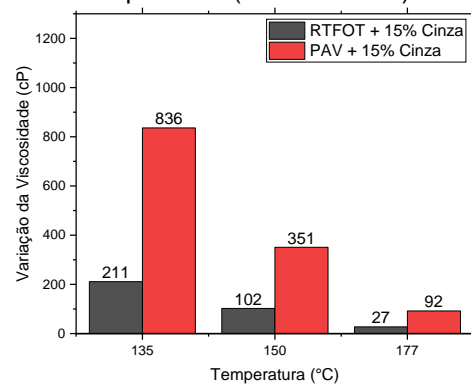


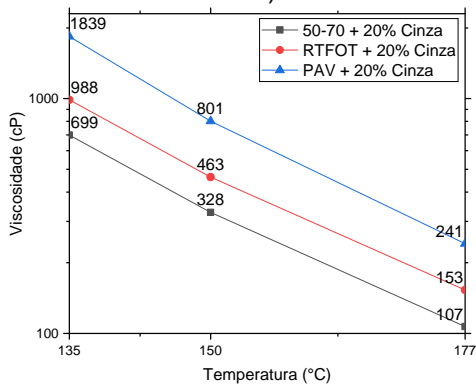
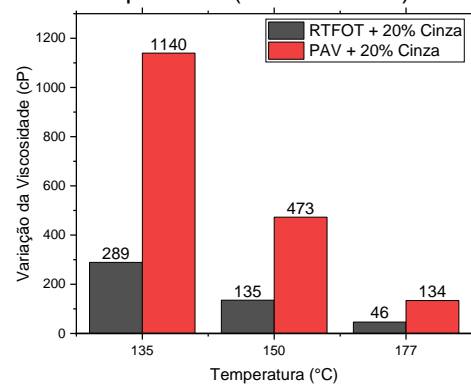
**Figura 89. Viscosidade x temperatura (PAV)**

**Figura 90. Viscosidade x cinza (PAV)**


Da **Figura 91** até a **Figura 100** são apresentados os comparativos entre a viscosidade do CAP não envelhecido com a viscosidade após o seu envelhecimento em função da temperatura de ensaio para cada percentual de cinza. Assim como aconteceu com o acréscimo de cinza, o envelhecimento do CAP também aumenta a sua viscosidade, sendo a magnitude dessa variação maior na temperatura de 135 °C e para maiores percentuais de cinza. Esse resultado indica um aumento da inclinação das curvas de viscosidade após o envelhecimento, o qual é acentuado pela modificação, tornando ainda maior a variabilidade da viscosidade com a temperatura.

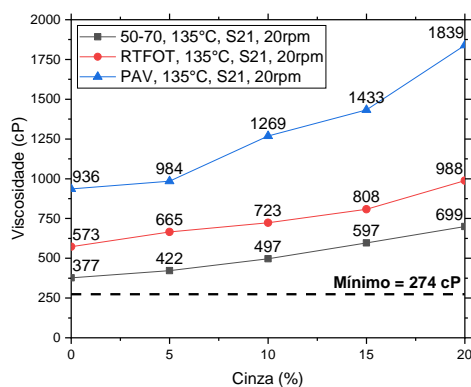
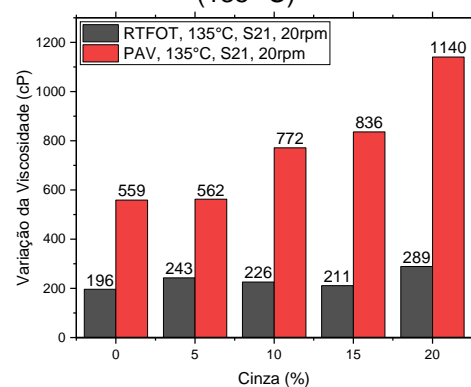
**Figura 91. Viscosidade x temperatura (sem modificação)**

**Figura 92. Variação da viscosidade x temperatura (sem modificação)**


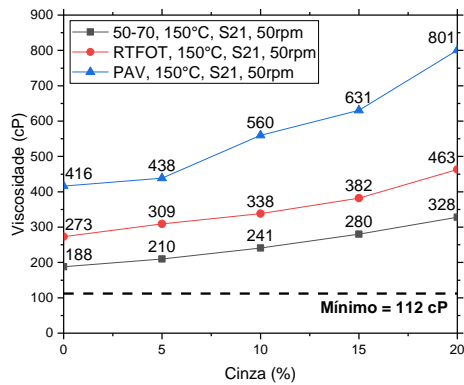
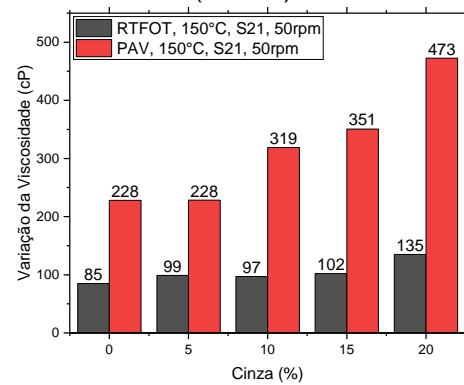
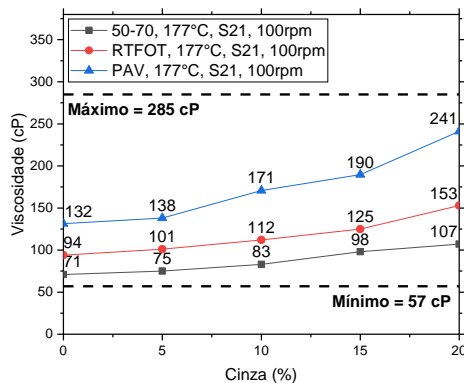
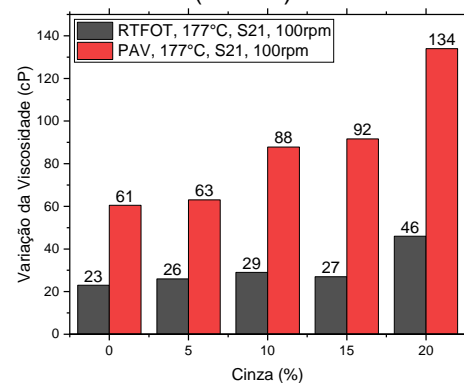


**Figura 93.** Viscosidade x temperatura (05% de cinza)**Figura 94.** Variação da viscosidade x temperatura (05% de cinza)**Figura 95.** Viscosidade x temperatura (10% de cinza)**Figura 96.** Variação da viscosidade x temperatura (10% de cinza)**Figura 97.** Viscosidade x temperatura (15% de cinza)**Figura 98.** Variação da viscosidade x temperatura (15% de cinza)

**Figura 99.** Viscosidade x temperatura (20% de cinza)

**Figura 100.** Variação da viscosidade x temperatura (20% de cinza)


A partir da **Figura 101** até a **Figura 106** são apresentados os gráficos comparativos da viscosidade antes do envelhecimento com a viscosidade após o envelhecimento do CAP em função da quantidade percentual de cinza para cada temperatura de ensaio. Além do aumento da viscosidade em função do acréscimo de cinza, é possível observar que a magnitude de sua variação após o envelhecimento de curto prazo (RTFOT) se mantém praticamente constante, enquanto que para o envelhecimento de longo prazo (PAV) se observa um aumento gradativo com a quantidade de cinza. Os gráficos mostram também que todos os resultados dos ensaios de viscosidade ficaram dentro dos limites estabelecidos na DNIT 095. Além disso, estão abaixo do limite máximo de 3 Pa.s (3000 cP) estabelecido pelas especificações Superpave para 135 °C na norma AASTHO M320.

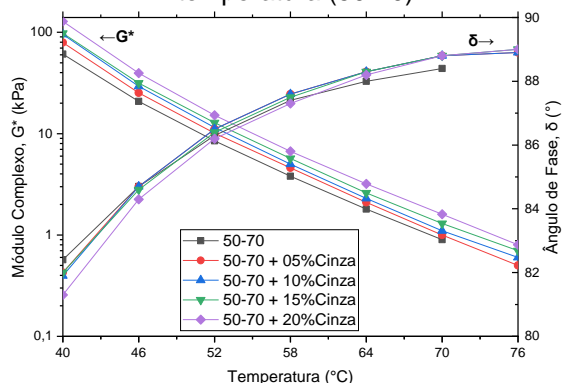
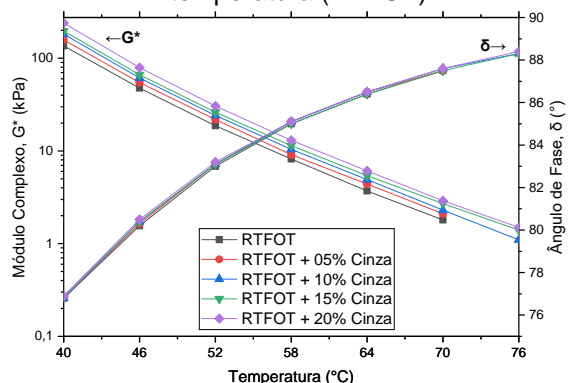
**Figura 101.** Viscosidade x cinza (135 °C)

**Figura 102.** Variação da viscosidade x cinza (135 °C)


**Figura 103.** Viscosidade x cinza (150 °C)**Figura 104.** Variação da viscosidade x cinza (150 °C)**Figura 105.** Viscosidade x cinza (177 °C)**Figura 106.** Variação da viscosidade x cinza (177 °C)

### 5.3.2 Análise da resistência à deformação permanente no DSR

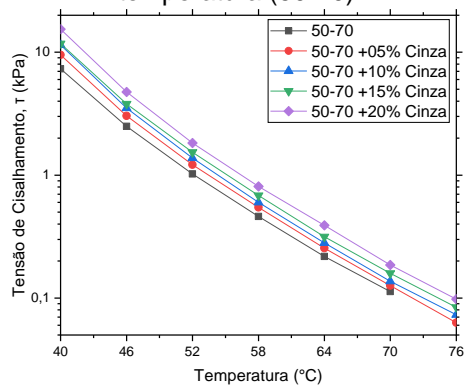
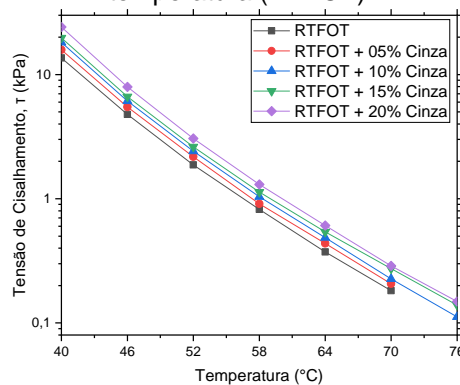
A análise da resistência do CAP à deformação permanente foi realizada no DSR com amostras não envelhecidas (50-70) e amostras envelhecidas no curto prazo (RTFOT). O ensaio foi iniciado em 40 °C, aumentando 6 °C a cada 10 minutos e finalizando em 88 °C ou quando o parâmetro  $G^*/\sin(\delta)$  atingisse o limite mínimo de 1,0 kPa para amostras não envelhecidas e 2,2 kPa para amostras envelhecidas no RTFOT. Foram utilizadas placas de 25 mm de diâmetro e distanciamento de 1,0 mm entre si.

A **Figura 107** e a **Figura 108** apresentam os resultados do DSR para o módulo complexo ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ) do ligante não envelhecido (50-70) e do envelhecido no curto prazo (RTFOT) em função da temperatura de ensaio.

**Figura 107.** Módulo complexo e ângulo de fase x temperatura (50-70)**Figura 108.** Módulo complexo e ângulo de fase x temperatura (RTFOT)

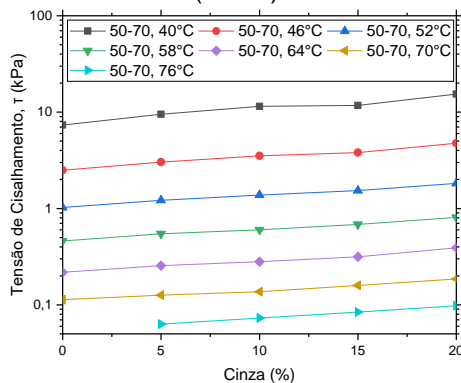
O aumento da temperatura reduz o módulo complexo e aumenta o ângulo de fase, tanto para o CAP não envelhecido como para o envelhecido e para todos os percentuais de cinza usados na modificação. Esse resultado indica que o CAP perde resistência à deformação e as deformações elásticas (recuperáveis) são cada vez menores em temperaturas mais altas, como consequência às deformações plásticas (irreversíveis) aumentam com a temperatura e o ligante perde a capacidade de retornar ao seu estado original.

Como o módulo complexo ( $G^*$ ) representa a relação entre a tensão cisalhante aplicada e a deformação resultante e o DSR trabalha com aplicação de uma deformação constante para medição dos parâmetros reológicos, a diminuição do parâmetro  $G^*$  com a temperatura significa que é necessária uma menor tensão de cisalhamento para provocar a mesma magnitude de deformação. A **Figura 109** e a **Figura 110** mostram os valores da tensão de cisalhamento em função da temperatura de ensaio para o ligante não envelhecido e para o envelhecido no curto prazo.

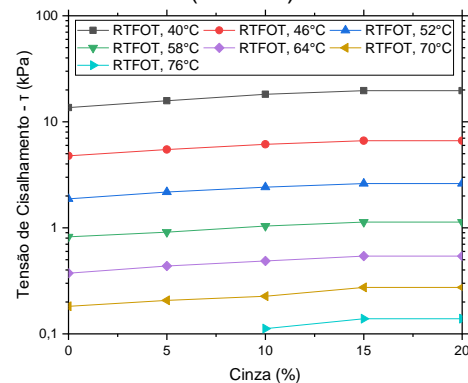
**Figura 109.** Tensão de cisalhamento x temperatura (50-70)**Figura 110.** Tensão de cisalhamento x temperatura (RTFOT)

A **Figura 111** e a **Figura 112** mostram a evolução da tensão de cisalhamento com a quantidade de cinza para todas as faixas de temperatura, antes e após o envelhecimento. É possível observar que a tensão de cisalhamento aumenta com a quantidade de cinza, indicando que para provocar no ligante modificado o mesmo nível de deformação do CAP original é necessária uma maior tensão cisalhante.

**Figura 111.** Tensão de cisalhamento x cinza (50-70)



**Figura 112.** Tensão de cisalhamento x cinza (RTFOT)

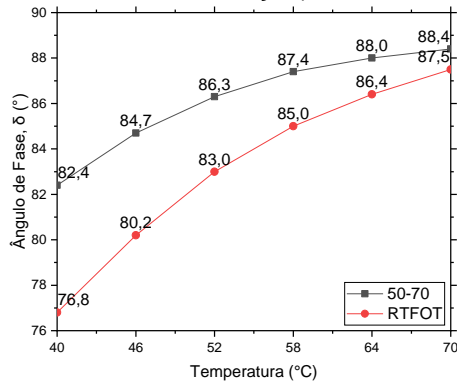


### 5.3.2.1 Ângulo de fase ( $\delta$ )

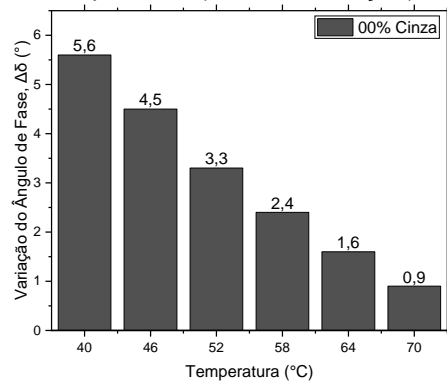
O ângulo de fase fornece uma indicação da elasticidade do CAP e a sua capacidade de recuperar as deformações sofridas. A deformação do CAP, provocada pela tensão cisalhante, tem suas componentes elásticas e viscosas relacionadas ao módulo complexo através do ângulo de fase. Quanto menor o ângulo de fase maior será a elasticidade do ligante e maior será a sua capacidade de recuperar as deformações sofridas.

São apresentados da **Figura 113** até a **Figura 122** os comparativos entre o ângulo de fase do CAP envelhecido com o do não envelhecido e a magnitude de sua variação após o envelhecimento em função da temperatura de ensaio e para cada percentual de cinza. Os gráficos mostram que o ângulo de fase aumenta com a temperatura, porém após o envelhecimento de curto prazo (RTFOT) há um deslocamento da curva para baixo, ou seja, o CAP ganha elasticidade com o envelhecimento. A magnitude dessa variação é maior nas temperaturas mais baixas e diminui gradativamente com o aumento da temperatura. Esse resultado mostra que o ligante envelhecido perde elasticidade a uma taxa maior com o aumento da temperatura e tende aos mesmos valores do ligante não envelhecido nas temperaturas mais altas. Como será apresentando mais adiante, o ganho de elasticidade se dá exclusivamente pelo envelhecimento do CAP e a cinza pouco contribuiu para esse resultado.

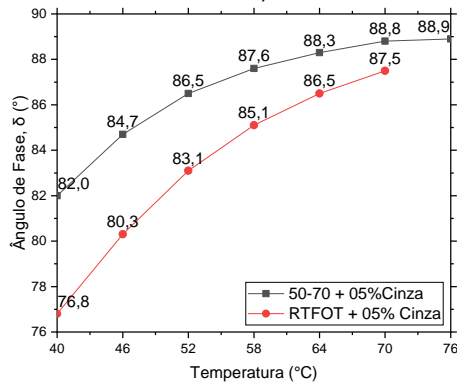
**Figura 113.** Ângulo de fase x temperatura (sem modificação)



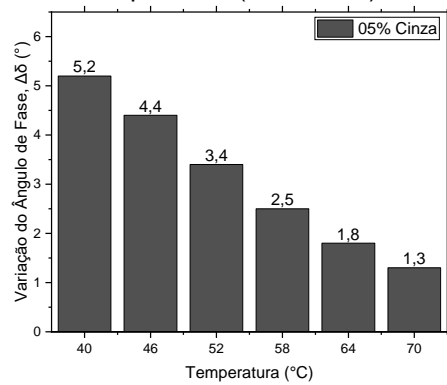
**Figura 114.** Variação do ângulo de fase x temperatura (sem modificação)



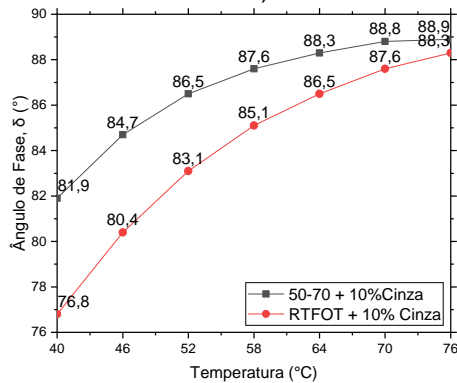
**Figura 115.** Ângulo de fase x temperatura (05% cinza)



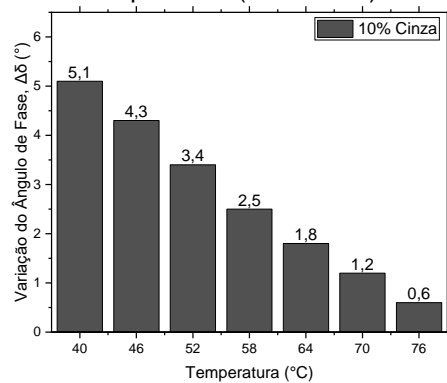
**Figura 116.** Variação do ângulo de fase x temperatura (05% cinza)

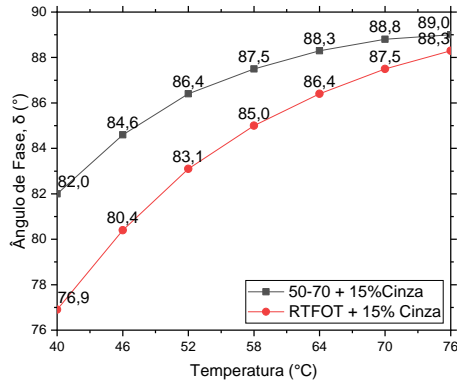
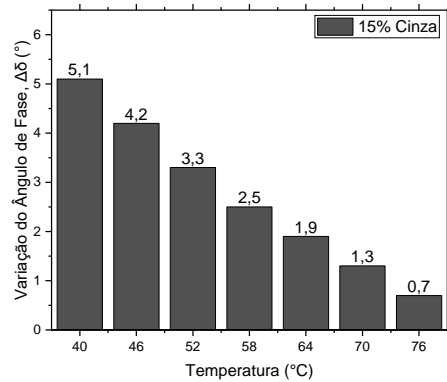
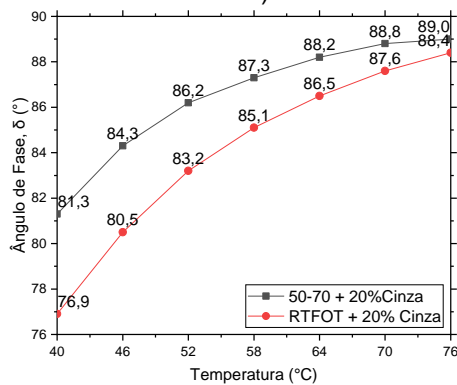
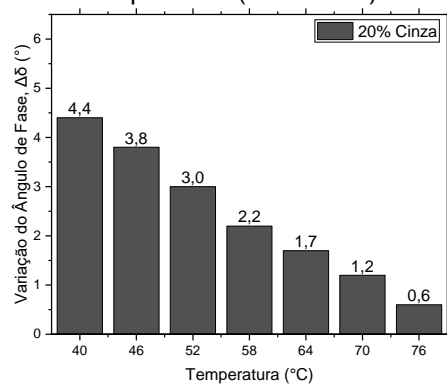


**Figura 117.** Ângulo de fase x temperatura (10% cinza)

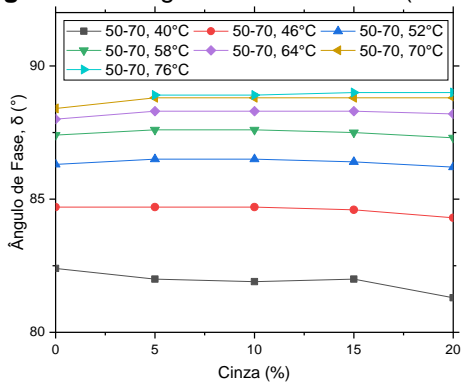
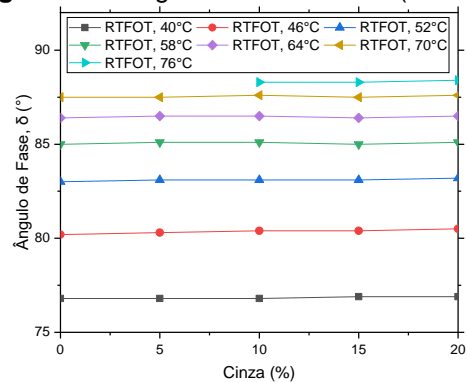


**Figura 118.** Variação do ângulo de fase x temperatura (10% cinza)



**Figura 119.** Ângulo de fase x temperatura (15% cinza)**Figura 120.** Variação do ângulo de fase x temperatura (15% cinza)**Figura 121.** Ângulo de fase x temperatura (20% cinza)**Figura 122.** Variação do ângulo de fase x temperatura (20% cinza)

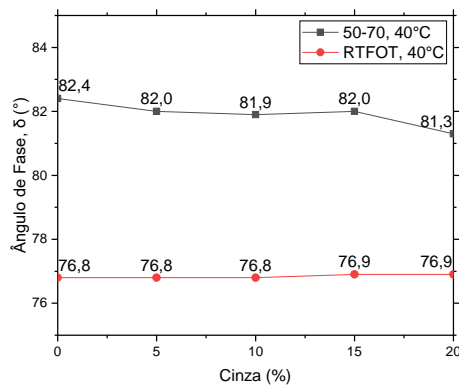
A **Figura 123** e a **Figura 124** mostram o ângulo de fase em função da quantidade percentual de cinza para o ligante não envelhecido e para o envelhecido em todas as faixas de temperatura.

**Figura 123.** Ângulo de fase x cinza (50-70)**Figura 124.** Ângulo de fase x cinza (RTFOT)

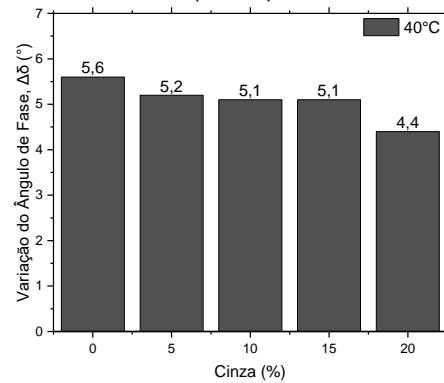
O ângulo de fase se manteve praticamente inalterado após a modificação com cinza, com exceção das temperaturas mais baixas do CAP não envelhecido, onde se observa uma pequena diminuição desse parâmetro, porém que não se repete após o envelhecimento.

Da **Figura 125** até **Figura 138** é mostrado o comparativo entre o ângulo de fase do CAP não envelhecido com o do envelhecido no curto prazo (RTFOT) em função da quantidade percentual de cinza e a magnitude da sua variação após envelhecimento para cada temperatura de ensaio. É possível observar que o ganho de elasticidade proporcionado pelo envelhecimento do CAP não tem relação com o acréscimo de cinza. Dessa forma, a cinza não apresenta nenhuma contribuição significativa com o ganho ou perda de elasticidade do ligante.

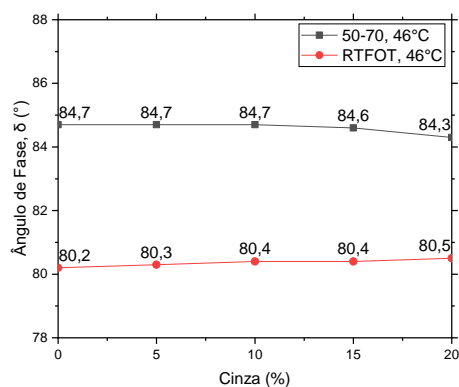
**Figura 125.** Ângulo de fase x cinza (40 °C)



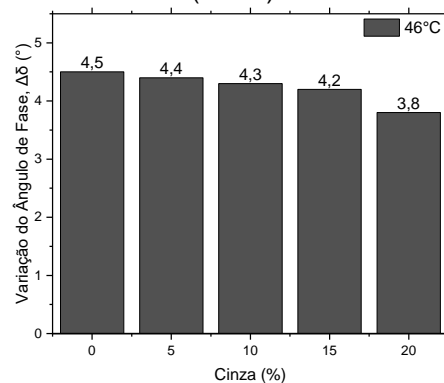
**Figura 126.** Variação do ângulo de fase x cinza (40 °C)



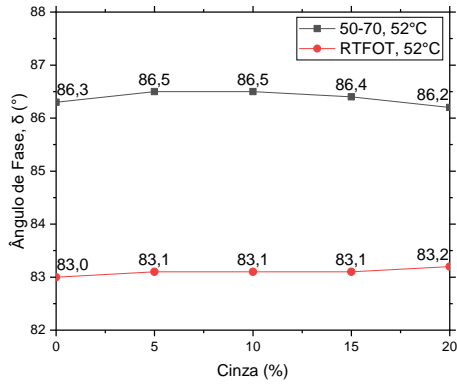
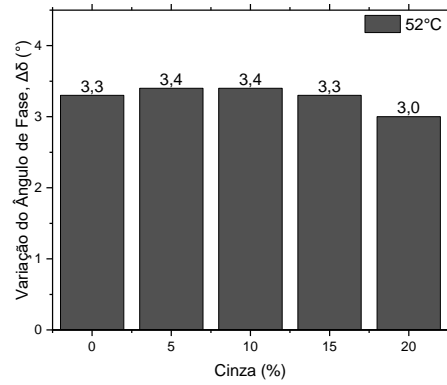
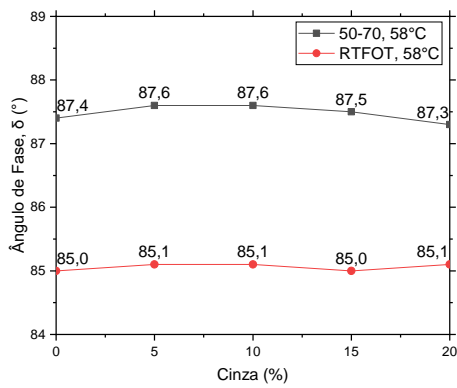
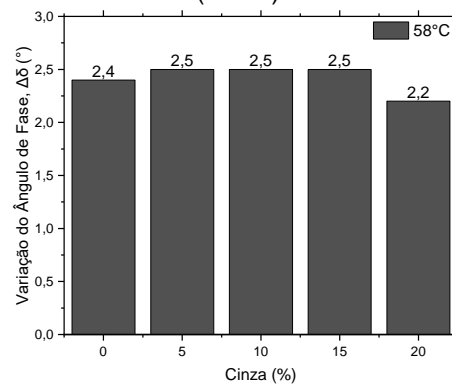
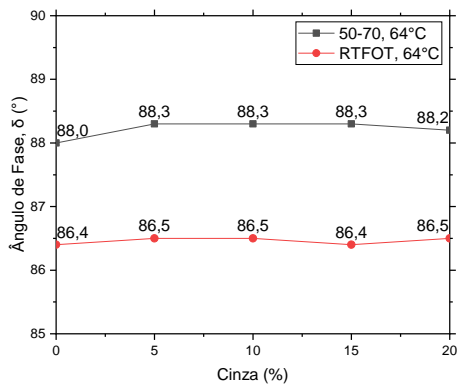
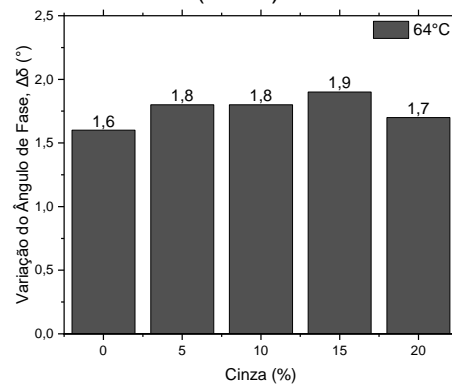
**Figura 127.** Ângulo de fase x cinza (46 °C)

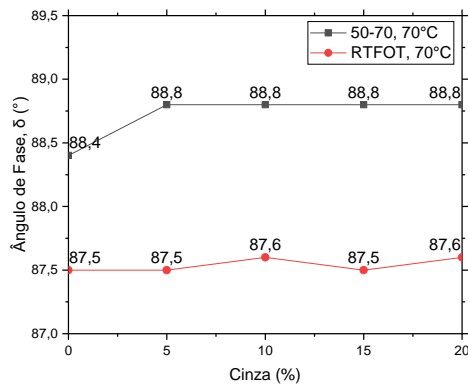
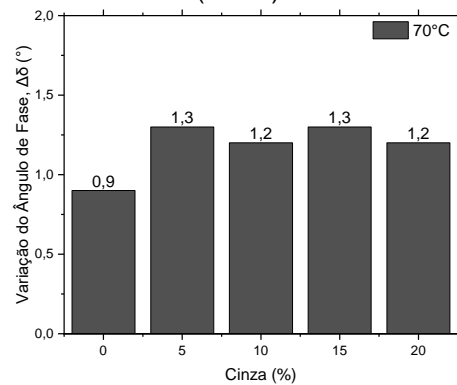
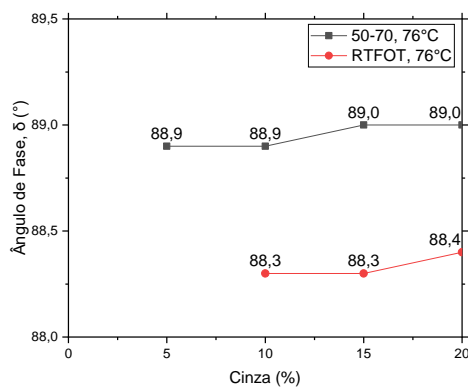
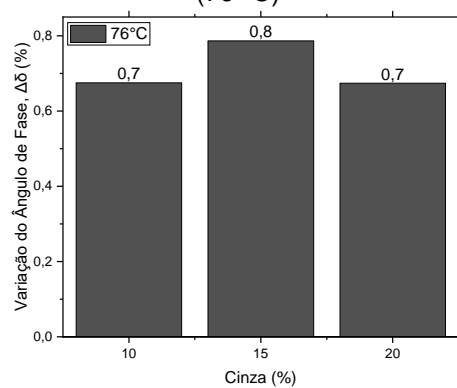


**Figura 128.** Variação do ângulo de fase x cinza (46 °C)





**Figura 129.** Ângulo de fase x cinza (52 °C)**Figura 130.** Variação do ângulo de fase x cinza (52 °C)**Figura 131.** Ângulo de fase x cinza (58 °C)**Figura 132.** Variação do ângulo de fase x cinza (58 °C)**Figura 133.** Ângulo de fase x cinza (64 °C)**Figura 134.** Variação do ângulo de fase x cinza (64 °C)

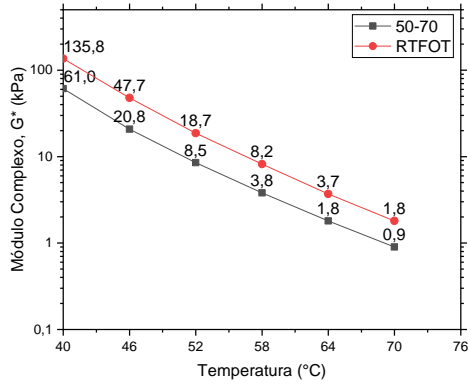
**Figura 135.** Ângulo de fase x cinza (70 °C)

**Figura 136.** Variação do ângulo de fase x cinza (70 °C)

**Figura 137.** Ângulo de fase x cinza (76 °C)

**Figura 138.** Variação do ângulo de fase x cinza (76 °C)


### 5.3.2.2 Módulo complexo ( $G^*$ )

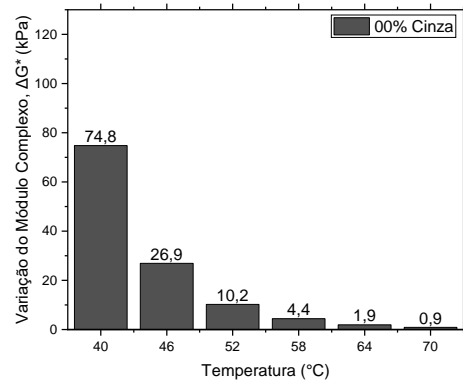
O módulo complexo é calculado a partir da relação entre a tensão de cisalhamento e a deformação resultante em uma determinada temperatura e fornece uma indicação da rigidez do ligante e a sua capacidade de resistir às deformações. Da **Figura 139** até a **Figura 148** são mostrados os comparativos entre o módulo complexo do CAP não envelhecido com o do CAP envelhecido no curto prazo (RTFOT) e a magnitude dessa variação após o envelhecimento em função da temperatura de ensaio e para cada percentual de cinza.

Observa-se que há um deslocamento para cima da curva após o envelhecimento, indicando que há um ganho de rigidez após o RTFOT. Esse aumento de rigidez ocorre em todas as temperaturas e para todos os percentuais de cinza. A maior magnitude de variação desse parâmetro ocorre nas temperaturas mais baixas e decai conforme ela aumenta. Isso significa que as duas curvas tendem a convergir nas temperaturas mais elevadas, ou seja, a taxa de diminuição do módulo complexo em função da temperatura é mais intensa no CAP envelhecido, tendo-se maior perda de rigidez com a elevação da temperatura se comparado ao ligante não envelhecido.

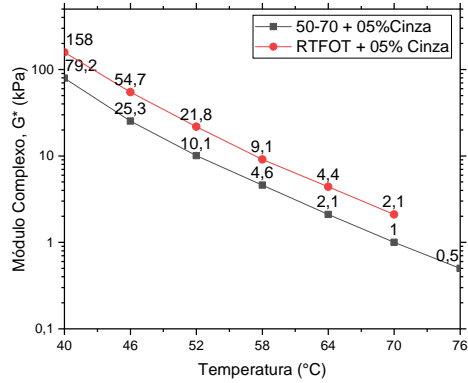
**Figura 139.** Módulo complexo x temperatura (sem modificação)



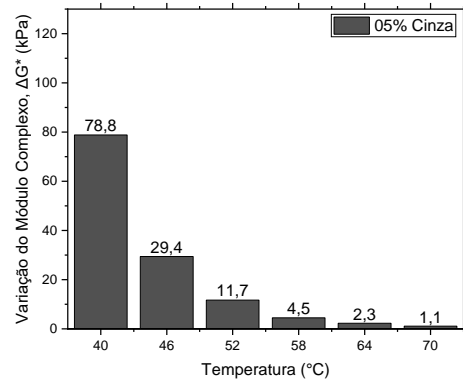
**Figura 140.** Variação do módulo complexo x temperatura (sem modificação)



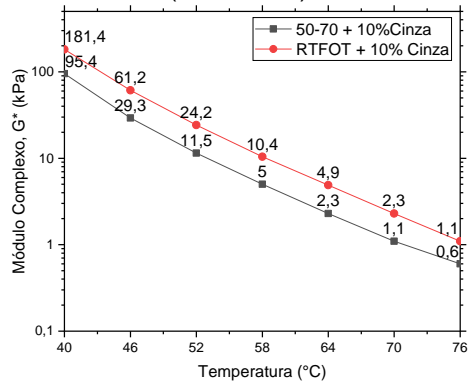
**Figura 141.** Módulo complexo x temperatura (05% cinza)



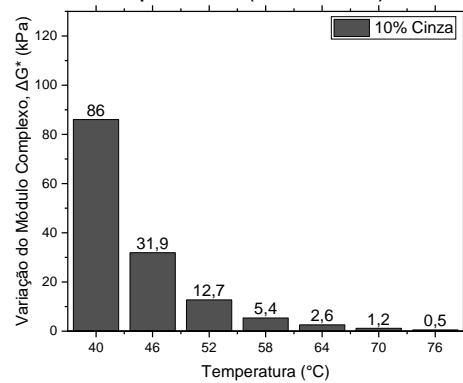
**Figura 142.** Variação do módulo complexo x temperatura (05% cinza)

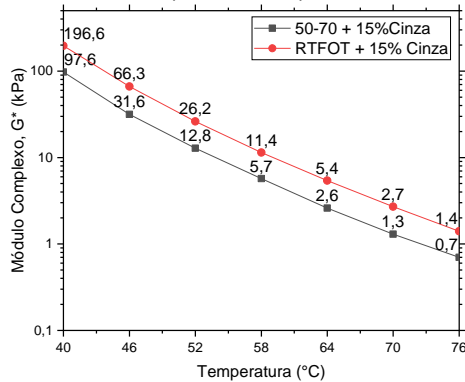
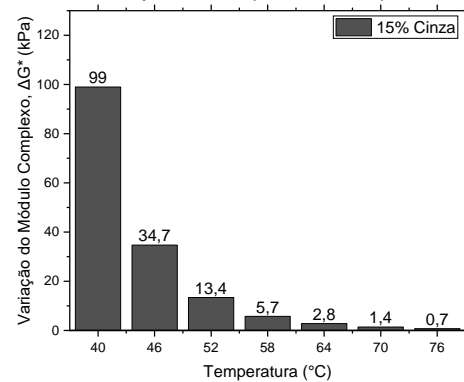
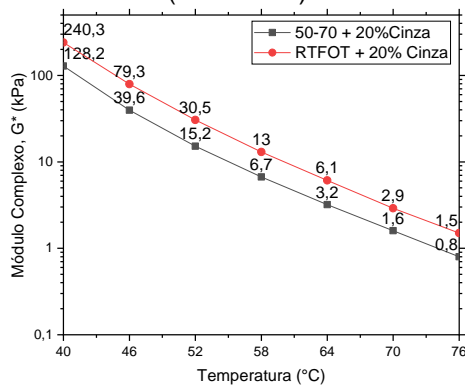
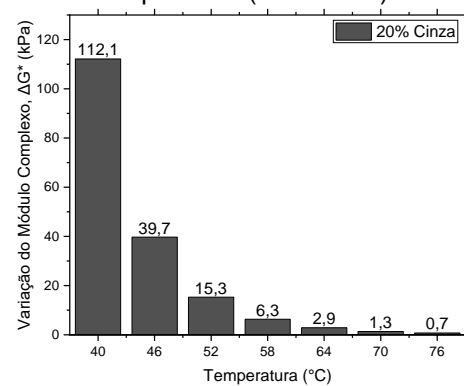


**Figura 143.** Módulo complexo x temperatura (10% cinza)

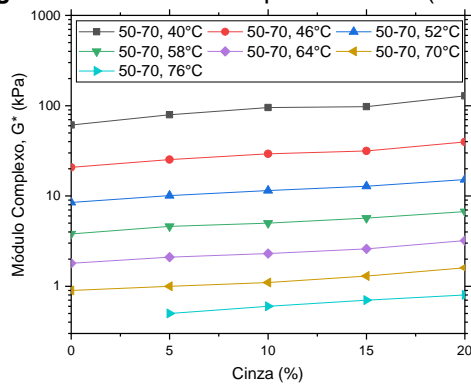
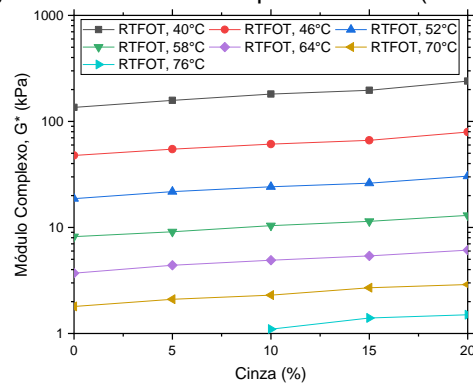


**Figura 144.** Variação do módulo complexo x temperatura (10% cinza)



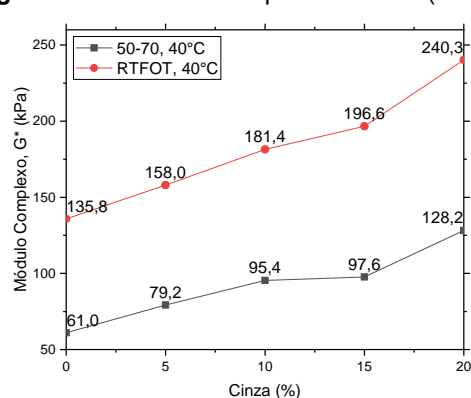
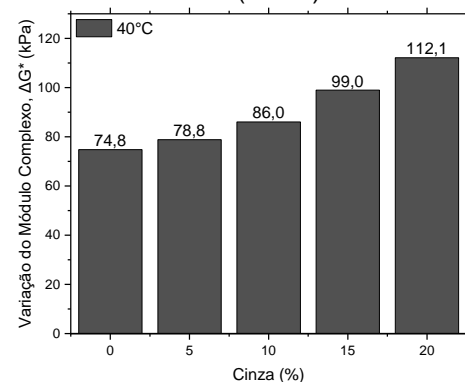
**Figura 145.** Módulo complexo x temperatura (15% cinza)

**Figura 146.** Variação do módulo complexo x temperatura (15% cinza)

**Figura 147.** Módulo complexo x temperatura (20% cinza)

**Figura 148.** Variação do módulo complexo x temperatura (20% cinza)


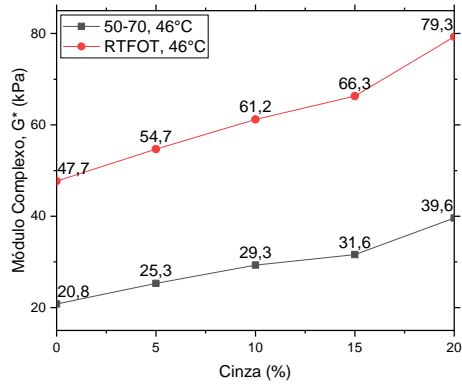
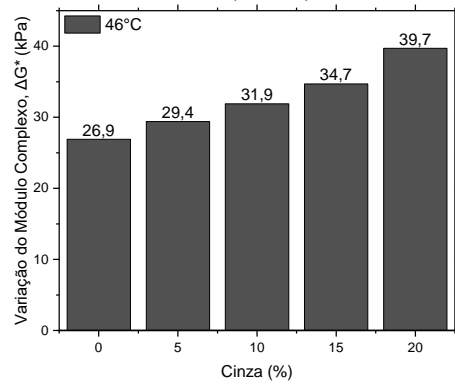
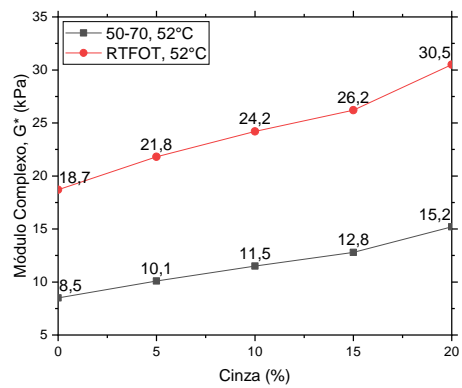
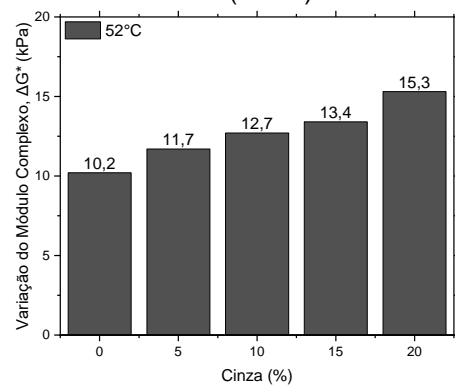
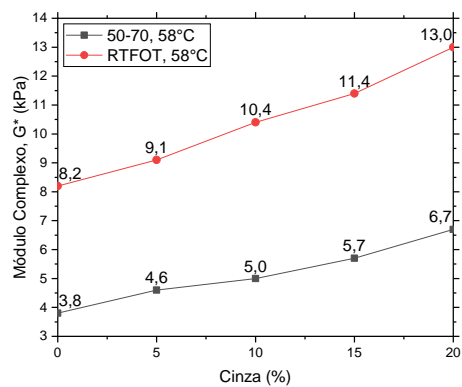
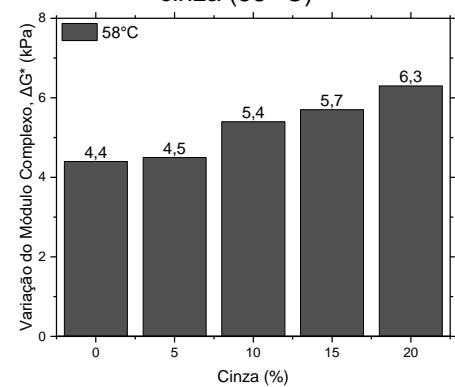
A **Figura 149** e a **Figura 150** mostram a evolução do módulo complexo em função da quantidade de cinza para o CAP não envelhecido e para o envelhecido no curto prazo (RTFOT) em todas as temperaturas de ensaio. Os gráficos mostram que o módulo complexo aumenta gradativamente com o acréscimo de cinza, esse aumento ocorre tanto para o ligante não envelhecido como para o envelhecido e em todas as temperaturas de ensaio, ou seja, a utilização da cinza na modificação do CAP faz aumentar a sua rigidez.

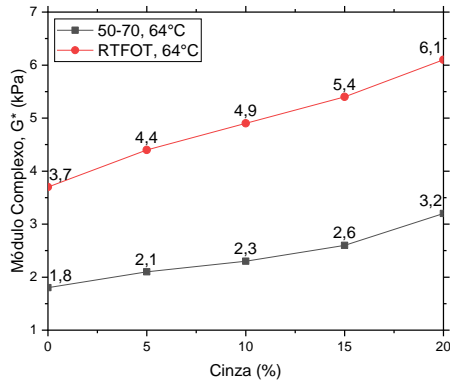
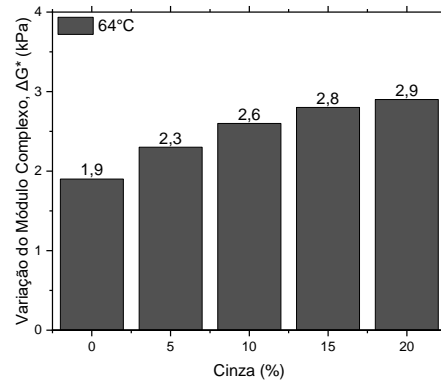
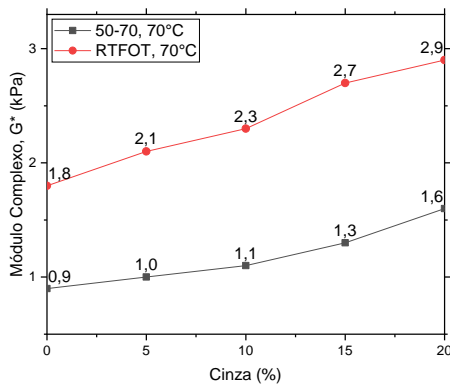
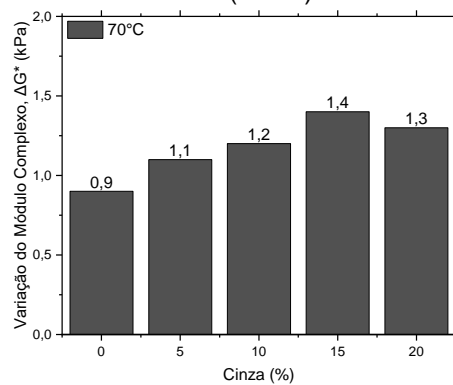
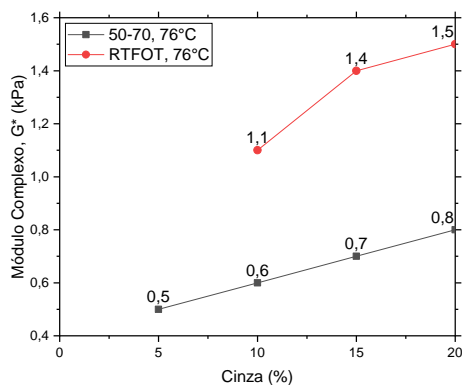
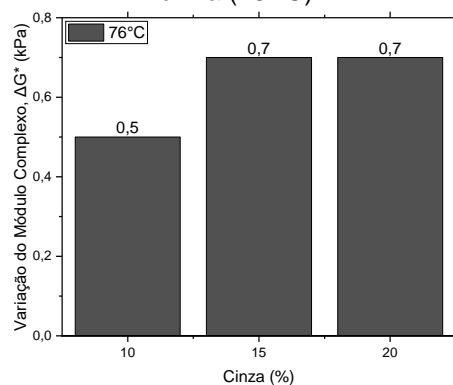
**Figura 149.** Módulo complexo x cinza (50-70)**Figura 150.** Módulo complexo x cinza (RTFOT)

Da **Figura 151** até a **Figura 162** são apresentados os gráficos comparativos do módulo complexo do CAP antes e após o envelhecimento de curto prazo (RTFOT) em função da quantidade percentual de cinza e a magnitude de sua variação após o envelhecimento e para cada temperatura de ensaio.

Além do crescimento gradativo do módulo complexo com a adição de cinza ao CAP e do aumento causado pelo processo de envelhecimento que é verificado pelo deslocamento da curva para cima, é possível observar que a magnitude da variação desse parâmetro após o envelhecimento tende a aumentar quanto maior for a quantidade percentual de cinza usada na modificação. Esse crescimento gradual da variação do módulo complexo após o envelhecimento aumenta ainda mais a inclinação da curva de  $G^*$  em função da temperatura e mostra que, além do envelhecimento, a cinza também contribui com o aumento da variabilidade da rigidez com a temperatura.

**Figura 151.** Módulo complexo x cinza (40 °C)**Figura 152.** Variação do módulo complexo x cinza (40 °C)

**Figura 153. Módulo complexo x cinza (46 °C)**

**Figura 154. Variação do módulo complexo x cinza (46 °C)**

**Figura 155. Módulo complexo x cinza (52 °C)**

**Figura 156. Variação do módulo complexo x cinza (52 °C)**

**Figura 157. Módulo complexo x cinza (58 °C)**

**Figura 158. Variação do módulo complexo x cinza (58 °C)**


**Figura 159.** Módulo complexo x cinza (64 °C)**Figura 160.** Variação do módulo complexo x cinza (64 °C)**Figura 161.** Módulo complexo x cinza (70 °C)**Figura 162.** Variação do módulo complexo x cinza (70 °C)**Figura 163.** Módulo complexo x cinza (76 °C)**Figura 164.** Variação do módulo complexo x cinza (76 °C)

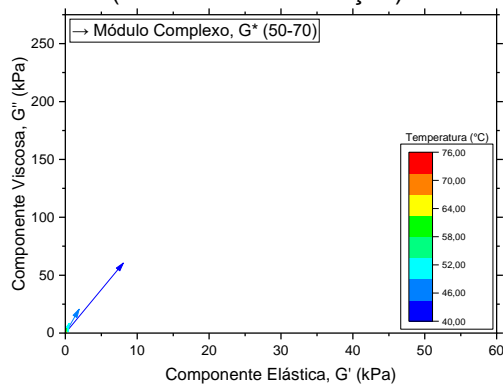
### 5.3.2.3 Comportamento viscoelástico

A partir dos resultados obtidos para o módulo complexo e para o ângulo de fase foi possível calcular as componentes elásticas e viscosas do CAP e desenhar os gráficos vetoriais do comportamento viscoelástico de cada amostra. Os gráficos estão na mesma escala para melhor representação visual do efeito do envelhecimento, temperatura e

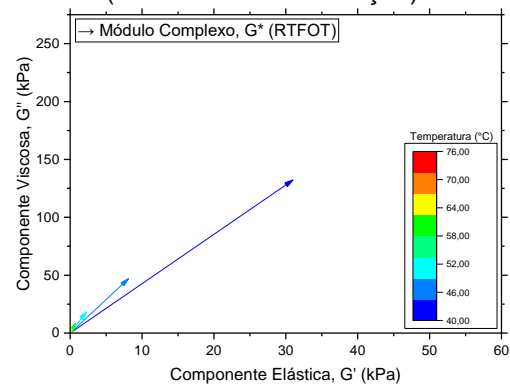
quantidade de cinza no comportamento viscoelástico do CAP e são mostrados da **Figura 165** até a **Figura 174**.

O vetor do módulo complexo se relaciona com as componentes elásticas e viscosas através do ângulo de fase e o ângulo de fase por sua vez representa a inclinação do vetor em relação ao eixo das abscissas. A projeção do vetor no eixo das abscissas fornece a componente elástica da deformação e a projeção no eixo das ordenadas fornece a componente viscosa. Os gráficos vetoriais são mostrados para cada percentual de cinza em todas as temperaturas de ensaio, antes e após o envelhecimento. Pode-se observar que o aumento da quantidade de cinza aumenta a magnitude do módulo complexo e como consequência as componentes elásticas e viscosas. Após o envelhecimento ocorre uma redução do ângulo de fase observada pela diminuição da inclinação dos vetores e o módulo complexo aumenta sua magnitude. Verifica-se também a importância da temperatura no comportamento viscoelástico do CAP mediante redução significativa do tamanho e do aumento da inclinação dos vetores conforme a temperatura de ensaio aumenta, evidenciando a perda de elasticidade e resistência à deformação ao ser aquecido.

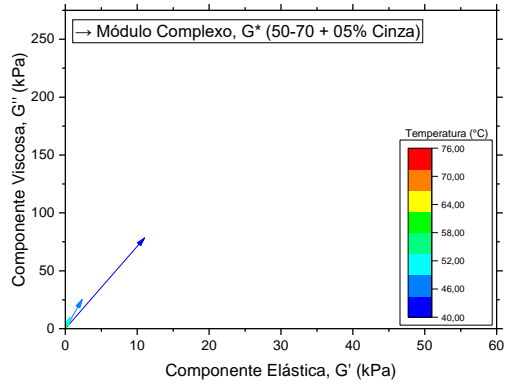
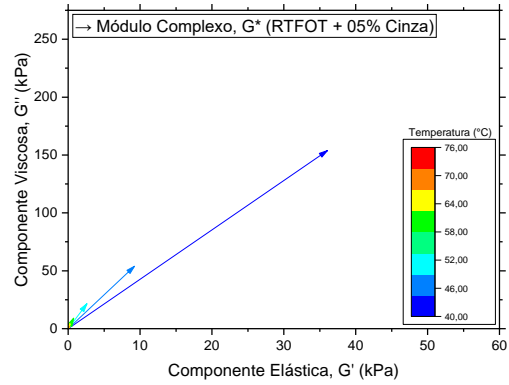
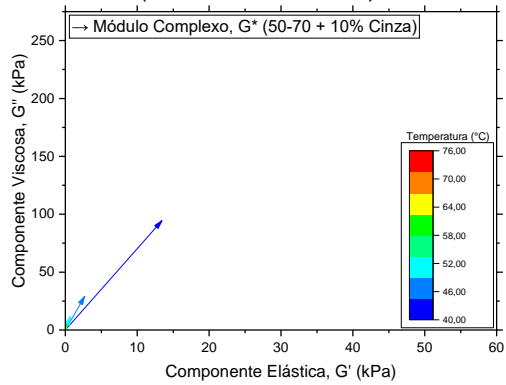
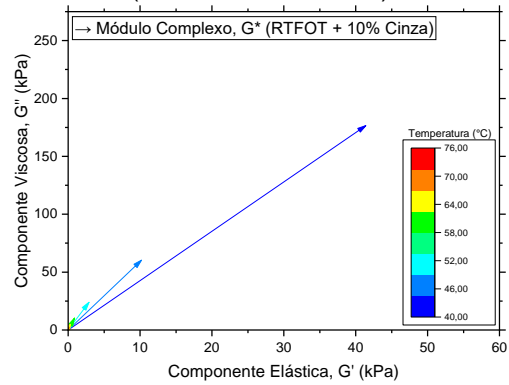
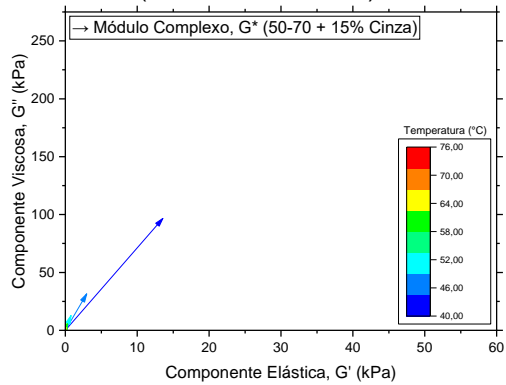
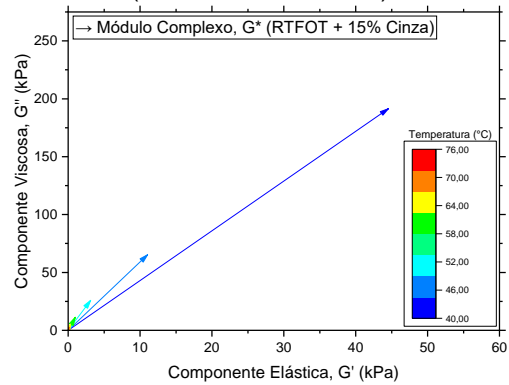
**Figura 165.** Componentes elásticas e viscosas (50-70 sem modificação)

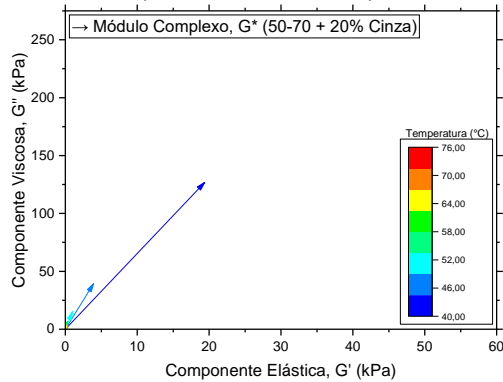
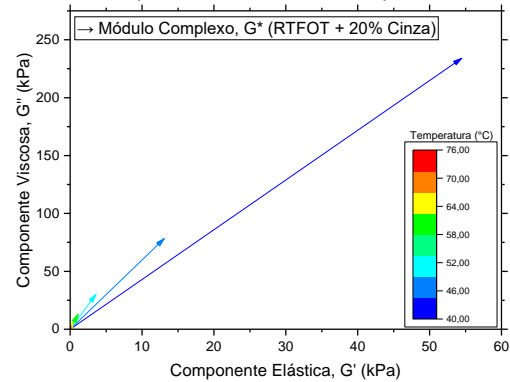


**Figura 166.** Componentes elásticas e viscosas (RTFOT sem modificação)





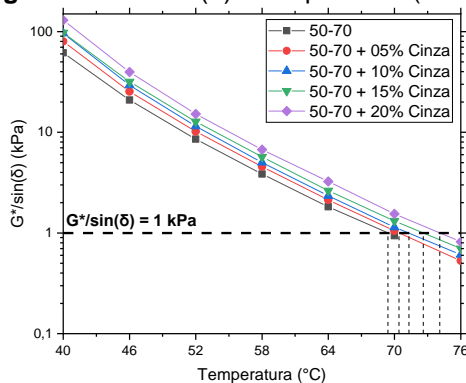
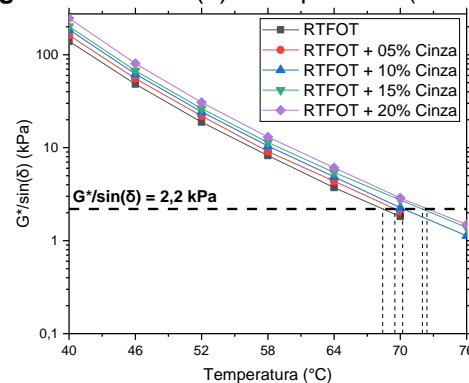
**Figura 167.** Componentes elásticas e viscosas (50-70 + 05% cinza)**Figura 168.** Componentes elásticas e viscosas (RTFOT + 05% cinza)**Figura 169.** Componentes elásticas e viscosas (50-70 + 10% cinza)**Figura 170.** Componentes elásticas e viscosas (RTFOT + 10% cinza)**Figura 171.** Componentes elásticas e viscosas (50-70 + 15% cinza)**Figura 172.** Componentes elásticas e viscosas (RTFOT + 15% cinza)

**Figura 173.** Componentes elásticas e viscosas (50-70 + 20% cinza)

**Figura 174.** Componentes elásticas e viscosas (RTFOT + 20% cinza)


### 5.3.2.4 Parâmetro de resistência à deformação permanente ( $G^*/\sin\delta$ )

A relação entre o módulo complexo e o seno do ângulo de fase é considerado como um parâmetro de resistência à deformação permanente nas especificações Superpave. Quanto maior o valor desse parâmetro, menor é o trabalho dissipado em forma de deformação durante um ciclo de carregamento.

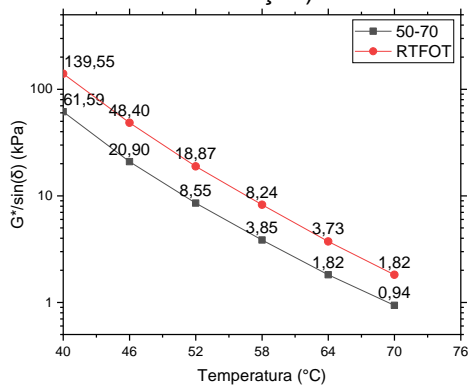
Os resultados de  $G^*/\sin(\delta)$  em função da temperatura, antes e após o envelhecimento do CAP, são mostrados na **Figura 175** e na **Figura 176**. Como o ângulo de fase pouco varia com modificação com a cinza e o seno do ângulo tem valores próximos de 1,0, as curvas de  $G^*$  e  $G^*/\sin(\delta)$  são bastante similares. É possível observar que parâmetro  $G^*/\sin(\delta)$  tende a diminuir com o aumento da temperatura, sendo resultado direto da diminuição do módulo complexo e do aumento do ângulo de fase com a temperatura. As linhas tracejadas nos gráficos representam os valores mínimos admissíveis de  $G^*/\sin(\delta)$ , definidos na norma AASTHO T315, sendo de 1,0 kPa para o ligante não envelhecido e de 2,2 kPa para o ligante envelhecido no curto prazo (RTFTO).

**Figura 175.**  $G^*/\sin(\delta)$  x temperatura (50-70)

**Figura 176.**  $G^*/\sin(\delta)$  x temperatura (RTFOT)


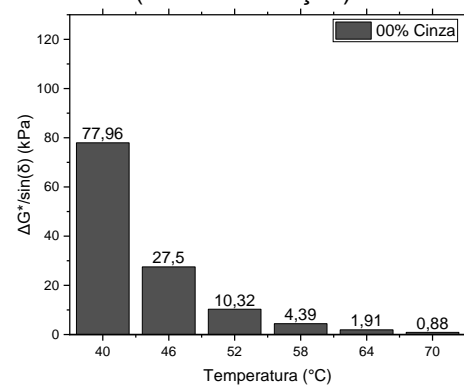
Da **Figura 177** até a **Figura 186** são apresentados os gráficos com o comparativo entre o parâmetro  $G^*/\sin(\delta)$  do CAP não envelhecido com o do envelhecido no curto prazo (RTFOT) em função da temperatura de ensaio e para cada percentual de cinza. O envelhecimento do CAP desloca a curva de  $G^*/\sin(\delta)$  para cima no gráfico e provoca um aumento da resistência à deformação permanente. Esse acréscimo de resistência é resultado de uma combinação entre o aumento do módulo complexo (aumento de rigidez) e a diminuição do ângulo de fase (aumento da elasticidade) que ocorre após o envelhecimento do ligante.

A variação de  $G^*/\sin(\delta)$  após o RTFOT é maior nas temperaturas mais baixas e tende a cair gradativamente com o aumento da temperatura. Assim como acontece com o ângulo de fase e o módulo complexo do ligante envelhecido, a taxa de variação de  $G^*/\sin(\delta)$  em função da temperatura é maior após o envelhecimento, isso mostra que a resistência à deformação permanente do CAP envelhecido decai mais rapidamente ao ser aquecido.

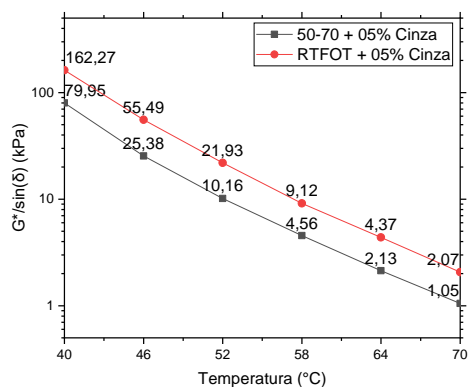
**Figura 177.**  $G^*/\sin(\delta)$  x temperatura (sem modificação)



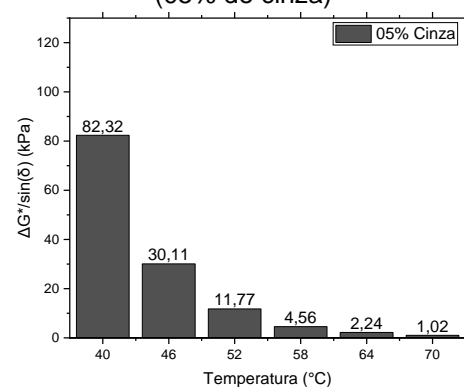
**Figura 178.** Variação de  $G^*/\sin(\delta)$  x temperatura (sem modificação)

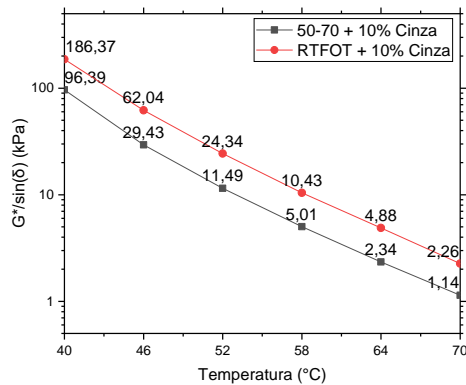
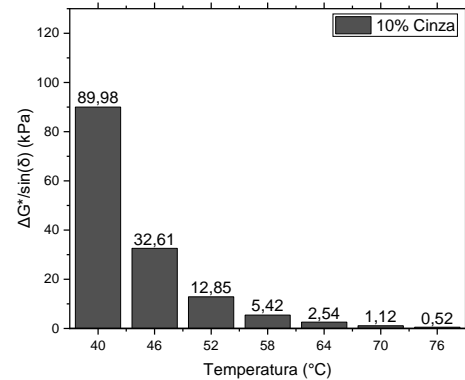
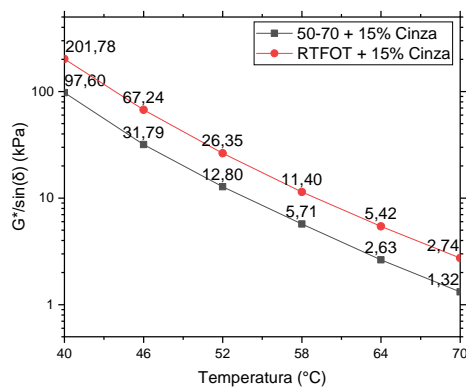
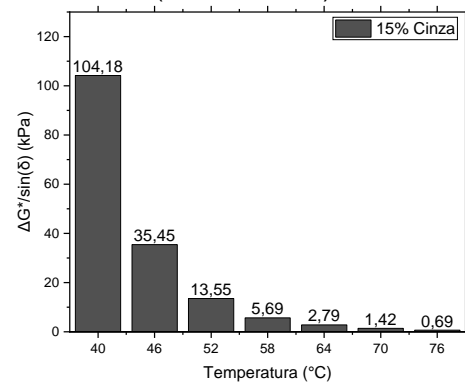
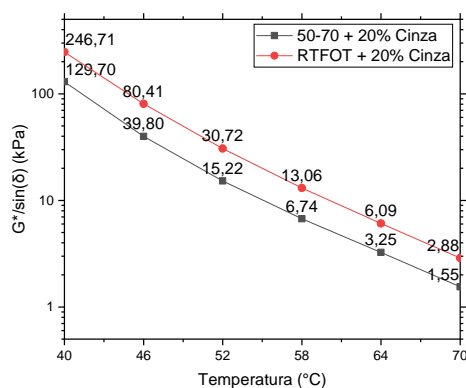
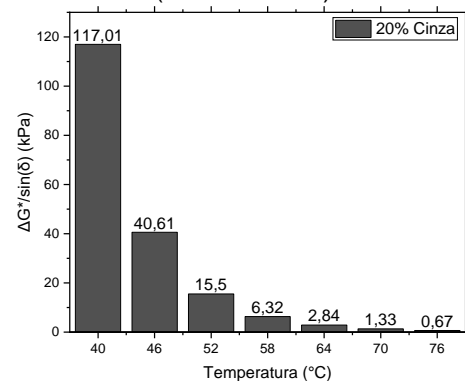


**Figura 179.**  $G^*/\sin(\delta)$  x temperatura (05% cinza)



**Figura 180.** Variação de  $G^*/\sin(\delta)$  x temperatura (05% de cinza)

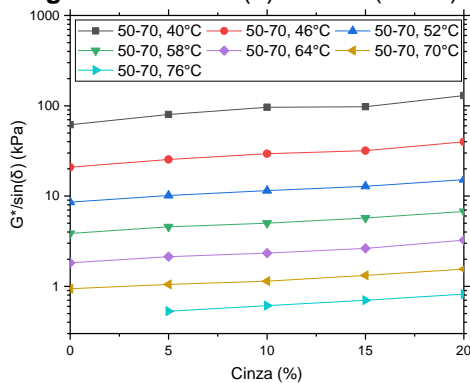


**Figura 181.**  $G^*/\sin(\delta)$  x temperatura (10% cinza)

**Figura 182.** Variação de  $G^*/\sin(\delta)$  x temperatura (10% de cinza)

**Figura 183.**  $G^*/\sin(\delta)$  x temperatura (15% cinza)

**Figura 184.** Variação de  $G^*/\sin(\delta)$  x temperatura (15% de cinza)

**Figura 185.**  $G^*/\sin(\delta)$  x temperatura (20% cinza)

**Figura 186.** Variação de  $G^*/\sin(\delta)$  x temperatura (20% de cinza)


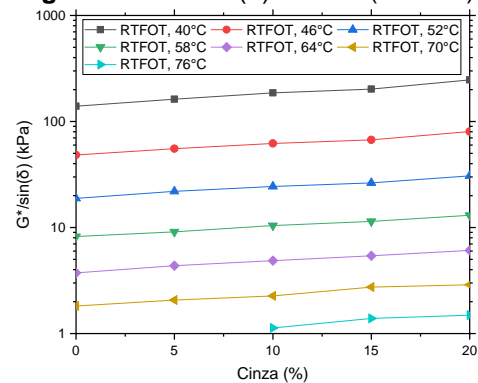
A **Figura 187** e a **Figura 188** mostram a evolução de  $G^*/\sin(\delta)$  do CAP não envelhecido e do envelhecido em função da quantidade de cinza e em todas as faixas de temperatura. O parâmetro  $G^*/\sin(\delta)$  tende a aumentar conforme se aumenta a quantidade de cinza. Esse ganho de resistência à deformação permanente se deu exclusivamente pelo aumento do módulo complexo, visto que a cinza pouco contribuiu com a diminuição do ângulo

de fase e o ganho de elasticidade. O ganho de rigidez após a modificação com cinza faz aumentar o valor do parâmetro  $G^*/\sin(\delta)$ , como esse parâmetro é inversamente proporcional ao trabalho dissipado em cada ciclo de carregamento, o uso da cinza contribui com a diminuição da dissipação de trabalho em forma de deformação.

**Figura 187.**  $G^*/\sin(\delta)$  x cinza (50-70)



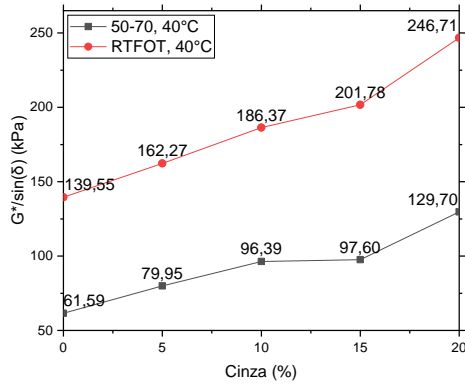
**Figura 188.**  $G^*/\sin(\delta)$  x cinza (RTFOT)



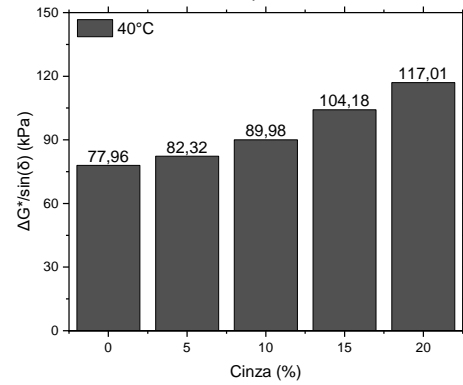
A partir da **Figura 189** até **Figura 202** são mostrados os gráficos comparativos entre o parâmetro  $G^*/\sin(\delta)$  do CAP envelhecido com o do não envelhecido e a magnitude dessa variação em função da quantidade percentual de cinza para cada temperatura de ensaio.

Além do ganho de resistência à deformação permanente, representado pelo aumento de  $G^*/\sin(\delta)$  após o envelhecimento, o aumento da quantidade de cinza faz aumentar também a magnitude da variação desse parâmetro após o envelhecimento. Como a magnitude dessa variação é muito maior nas temperaturas iniciais de ensaio, o uso da cinza contribuiu para o aumento da inclinação da curva principal de  $G^*/\sin(\delta)$  em função da temperatura. Esse resultado indica que o ganho de resistência à deformação permanente com o uso da cinza é mais relevante nas temperaturas mais baixas e o CAP perde resistência com mais intensidade ao se aumentar a temperatura de ensaio após a modificação.

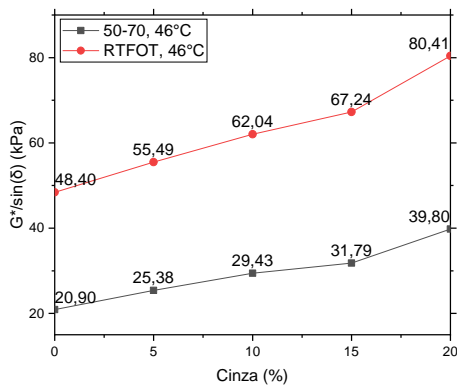
**Figura 189.**  $G^*/\sin(\delta)$  x cinza (40 °C)



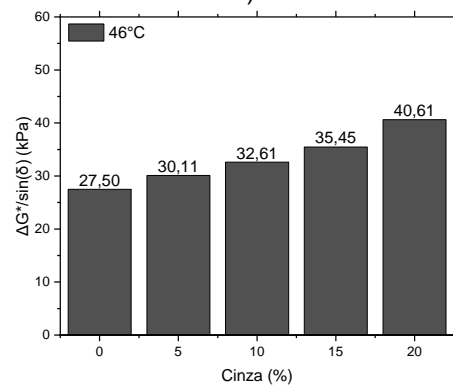
**Figura 190.** Variação do  $G^*/\sin(\delta)$  x cinza (40 °C)



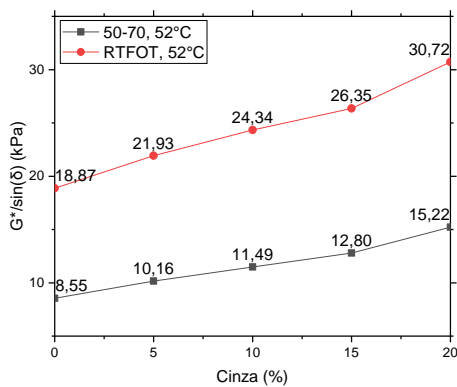
**Figura 191.**  $G^*/\sin(\delta)$  x cinza (46 °C)



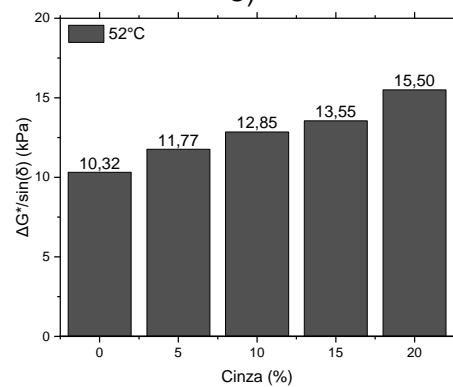
**Figura 192.** Variação do  $G^*/\sin(\delta)$  x cinza (46 °C)

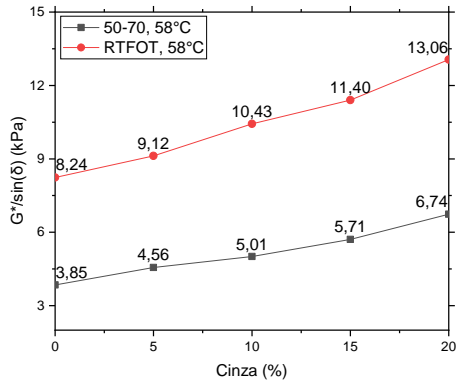
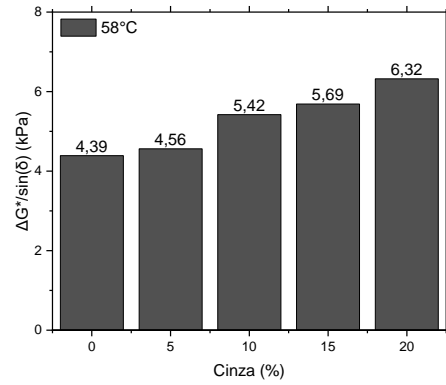
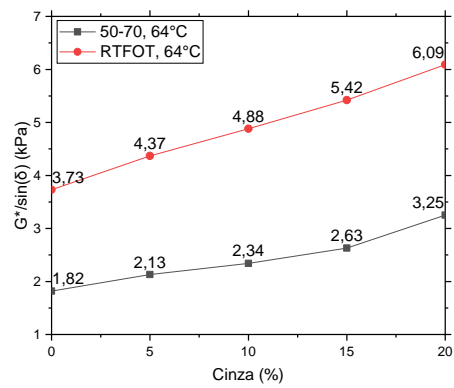
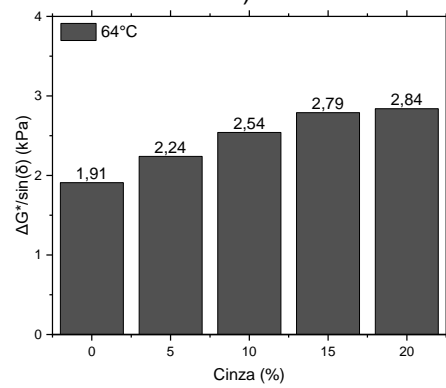
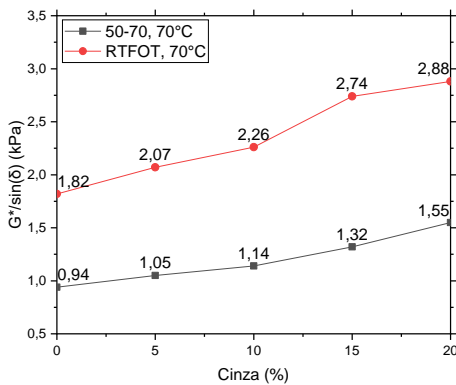
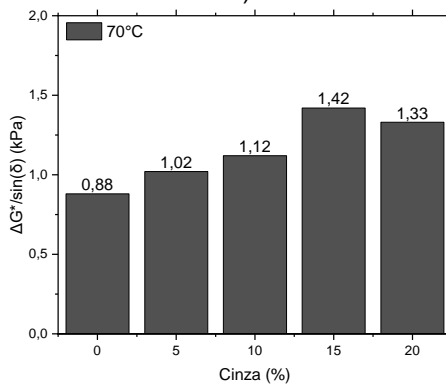


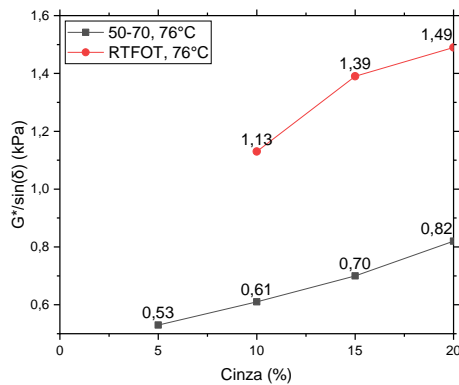
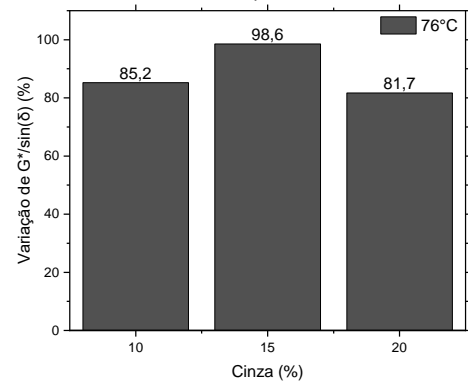
**Figura 193.**  $G^*/\sin(\delta)$  x cinza (52 °C)



**Figura 194.** Variação do  $G^*/\sin(\delta)$  x cinza (52 °C)



**Figura 195.**  $G^*/\sin(\delta)$  x cinza (58 °C)**Figura 196.** Variação do  $G^*/\sin(\delta)$  x cinza (58 °C)**Figura 197.**  $G^*/\sin(\delta)$  x cinza (64 °C)**Figura 198.** Variação do  $G^*/\sin(\delta)$  x cinza (64 °C)**Figura 199.**  $G^*/\sin(\delta)$  x cinza (70 °C)**Figura 200.** Variação do  $G^*/\sin(\delta)$  x cinza (70 °C)

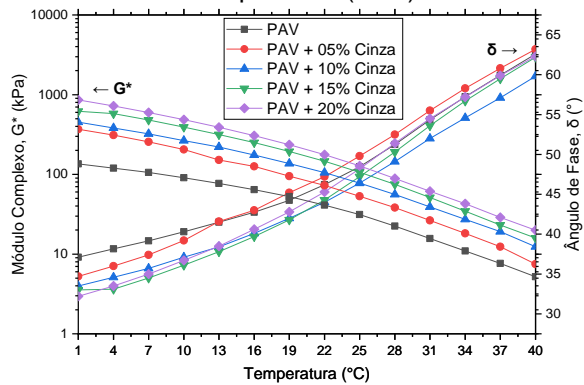
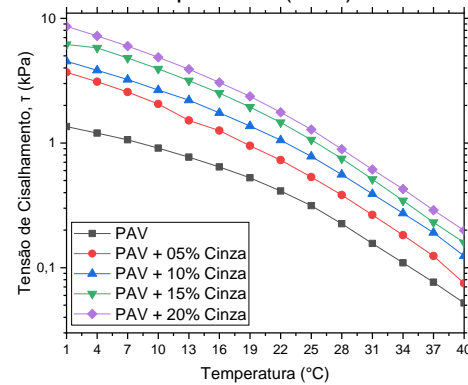
**Figura 201.**  $G^*/\sin(\delta)$  x cinza (76 °C)**Figura 202.** Variação do  $G^*/\sin(\delta)$  x cinza (76 °C)

### 5.3.3 Análise da resistência ao trincamento por fadiga no DSR

A análise da resistência do CAP ao trincamento por fadiga foi realizada no DSR com as amostras envelhecidas no longo prazo (PAV). O ensaio foi iniciado em 40 °C e diminuiu 3 °C a cada 10 minutos até 1 °C ou até o parâmetro  $G^* \cdot \sin(\delta)$  atingir o limite máximo de 5000 kPa. Foram utilizadas as placas de 8 mm de diâmetro com separação de 2 mm entre si.

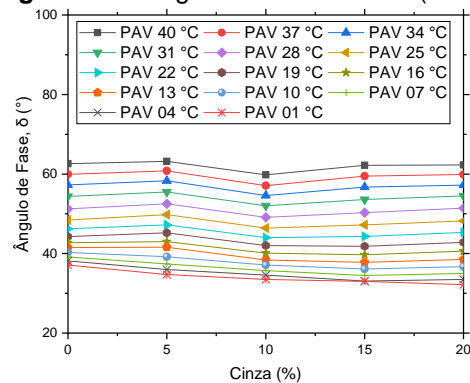
A **Figura 203** apresenta o resultado do DSR para o módulo complexo ( $G^*$ ) e para o ângulo de fase ( $\delta$ ) do ligante envelhecido no longo prazo (PAV) em função da temperatura de ensaio e para todos os percentuais de cinza. A diminuição da temperatura de ensaio aumenta o módulo complexo e a rigidez do CAP ao mesmo tempo que diminui o ângulo de fase aumentando a sua elasticidade. O incremento do módulo complexo nas temperaturas mais baixas contribui para o aumento da rigidez do CAP e da sua resistência à deformação. Em temperaturas mais altas esse é um efeito positivo, porém em baixas temperaturas a limitação da capacidade do ligante de se deformar cria tensões internas que se acumulam e que podem vir a ser dissipadas por meio de trincas. A **Figura 204** mostra a evolução da tensão de cisalhamento em função da temperatura, se observa que a diminuição da temperatura aumenta gradativamente a tensão necessária para provocar o mesmo nível de deformação nas amostras.



**Figura 203.** Módulo complexo e ângulo de fase x temperatura (PAV)**Figura 204.** Tensão de cisalhamento x temperatura (PAV)

### 5.3.3.1 Ângulo de fase ( $\delta$ )

A **Figura 205** mostra a evolução do ângulo de fase em função da quantidade percentual de cinza e para todas as faixas de temperatura. A diminuição do ângulo de fase contribui com a redução do trabalho dissipado por ciclo de carregamento, o que ajuda prevenir o surgimento de trincas por fadiga. É possível observar que há uma pequena redução do ângulo de fase com o acréscimo de cinza nas temperaturas mais baixas, promovendo um leve aumento da elasticidade do ligante, mas nada significativo.

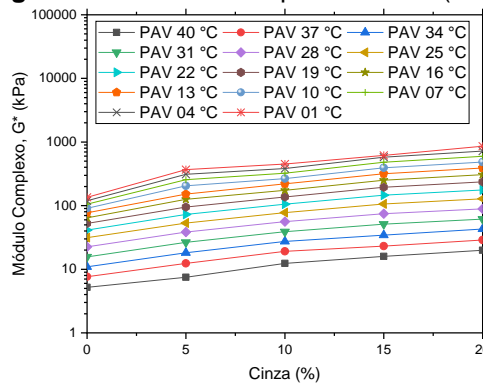
**Figura 205.** Ângulo de fase x cinza (PAV)

### 5.3.3.2 Módulo complexo ( $G^*$ )

A evolução do módulo complexo com o acréscimo de cinza é apresentada na **Figura 206** para todas as temperaturas de ensaio. Há um crescimento gradativo do módulo complexo com o aumento da quantidade de cinza. Esse aumento do módulo complexo resulta em uma maior rigidez e resistência à deformação, porém torna o ligante mais suscetível ao trincamento por fadiga. O ganho de rigidez aumenta o trabalho dissipado por ciclo e como a rigidez

restringe a capacidade do CAP dissipar as tensões internas em forma de deformação, aumentam-se as chances desse trabalho vir a ser dissipado na forma de trincas.

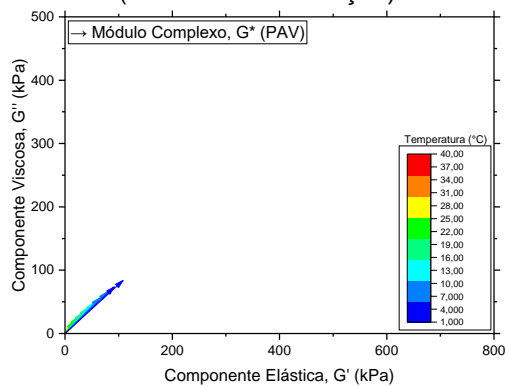
**Figura 206. Módulo complexo x cinza (PAV)**



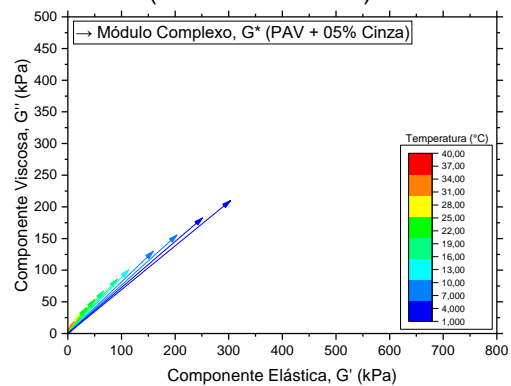
### 5.3.3.3 Comportamento viscoelástico

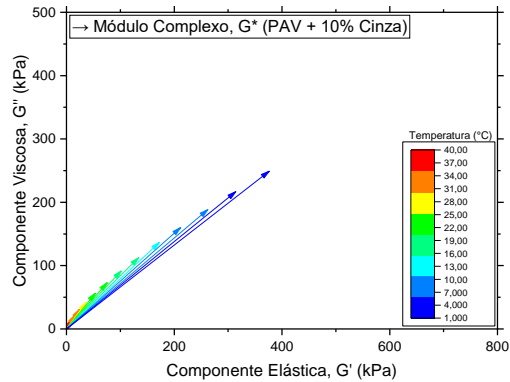
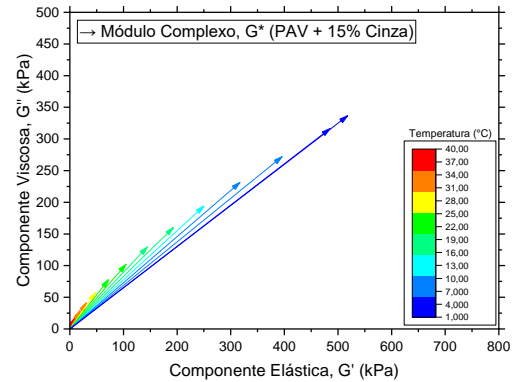
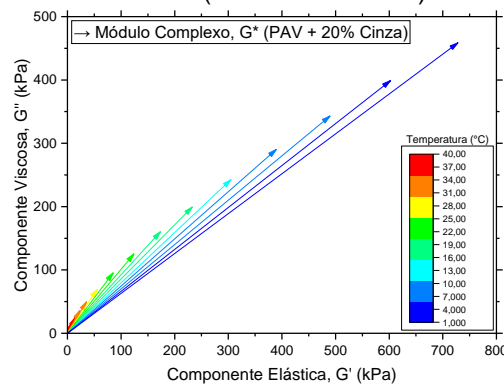
O comportamento viscoelástico das amostras pode ser observado da **Figura 207** até a **Figura 211**. Os gráficos mostram o vetor do módulo complexo variando em função da mudança de temperatura de ensaio e para todas as quantidades percentuais de cinza. É possível observar que o vetor do módulo complexo varia de forma mais significativa com a diminuição da temperatura nas amostras com maiores percentuais de cinza. É possível observar também como o acréscimo de cinza aumenta o tamanho do vetor  $G^*$  de um gráfico para outro, mas praticamente não altera sua inclinação, ou seja, há um ganho relevante de rigidez, mas não de elasticidade.

**Figura 207. Componentes elásticas e viscosas (PAV sem modificação)**



**Figura 208. Componentes elásticas e viscosas (PAV + 05% cinza)**



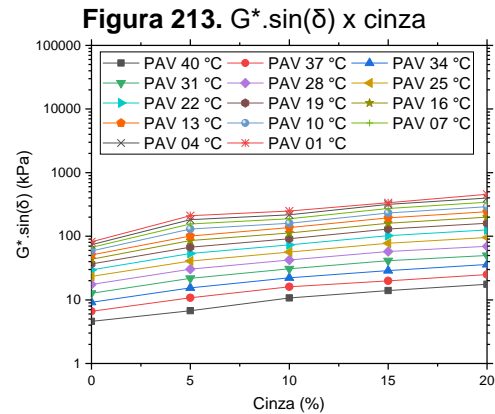
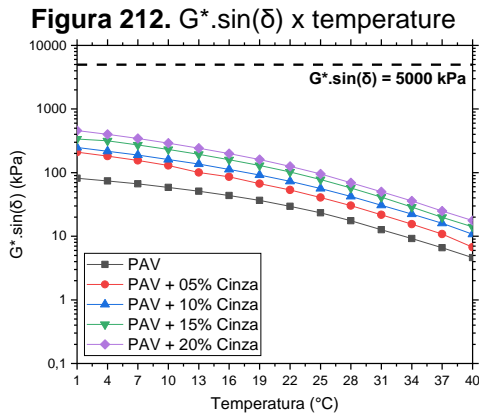
**Figura 209.** Componentes elásticas e viscosas (PAV + 10% cinza)**Figura 210.** Componentes elásticas e viscosas (PAV + 15% cinza)**Figura 211.** Componentes elásticas e viscosas (PAV + 20% cinza)

#### 5.3.3.4 Parâmetro de resistência ao trincamento por fadiga ( $G^* \cdot \sin \delta$ )

O produto do módulo complexo pelo seno do ângulo de fase fornece um parâmetro de resistência ao trincamento por fadiga. Quanto maior o valor de  $G^* \cdot \sin(\delta)$ , maior é a chance do trabalho acumulado ser dissipado em forma de trincas em um ciclo de carregamento. O valor máximo de  $G^* \cdot \sin(\delta)$ , definido nas especificações Superpave, é de 5000 kPa. A **Figura 212** mostra a evolução de  $G^* \cdot \sin(\delta)$  em função da temperatura para todos os percentuais de cinza.

O valor do parâmetro de resistência à fadiga,  $G^* \cdot \sin(\delta)$ , aumenta gradativamente com a diminuição da temperatura de ensaio e com o aumento da quantidade percentual de cinza. Conforme mencionado anteriormente, há um ganho de elasticidade proporcionado pela redução do ângulo de fase com a diminuição da temperatura de ensaio, esse ganho de elasticidade, de forma isolada, contribuiria para a melhorar a resistência à deformação permanente, porém o aumento do módulo complexo com o uso da cinza acaba sendo mais significativo, fazendo aumentar o valor de  $G^* \cdot \sin(\delta)$  e o trabalho dissipado por ciclo. Como a rigidez reduz a capacidade do ligante dissipar as tensões internas em forma de deformação, aumentam-se as chances de serem dissipadas na forma de trincas. Dessa forma, a cinza não

contribuiu com a melhora da resistência do CAP ao trincamento por fadiga. Apesar disso, o valor do parâmetro  $G^* \cdot \sin(\delta)$  em todas as amostras testadas ficou abaixo do valor máximo de 5000 kPa em todas as temperaturas de ensaio.



### 5.3.4 Grau de desempenho em altas temperaturas

O grau de desempenho do CAP (PG) para temperaturas elevadas é obtido comparando-se a última temperatura alcançada pelo parâmetro  $G^*/\sin(\delta)$  antes de falhar entre o ligante não envelhecido e o envelhecido no curto prazo (RTFOT). A última temperatura alcançada pode ser definida como a última temperatura de ensaio onde  $G^*/\sin(\delta)$  é superior a 1,0 kPa para o ligante não envelhecido e 2,2 kPa para o ligante envelhecido no curto prazo (RTFOT). A menor temperatura entre as duas é definida como o grau de desempenho do CAP em alta temperatura (ASTM D6373 apud LUCENA, 2005).

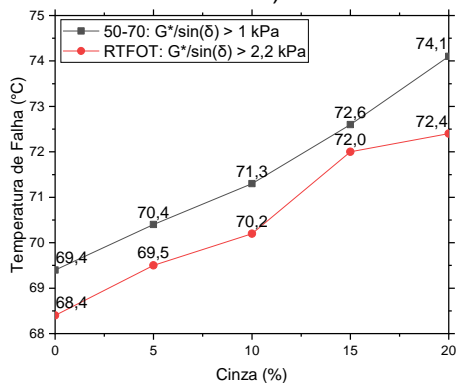
A **Figura 214** apresenta as temperaturas de falha do CAP não envelhecido e do envelhecido em função da quantidade de cinza. A **Figura 215** apresenta o grau de desempenho para temperaturas elevadas. A **Tabela 6** apresenta um resumo dos resultados obtidos.

O CAP sem modificação falhou aos 69,4  $^{\circ}\text{C}$  antes do envelhecimento e aos 68,4  $^{\circ}\text{C}$  após o envelhecimento no curto prazo. Como o DSR testa as amostras a cada 6  $^{\circ}\text{C}$  ambas passaram na temperatura de 64  $^{\circ}\text{C}$ , mas falharam na de 70  $^{\circ}\text{C}$ . Dessa forma, a última temperatura alcançada foi 64  $^{\circ}\text{C}$  e o grau de desempenho do CAP sem modificação é PG 64.

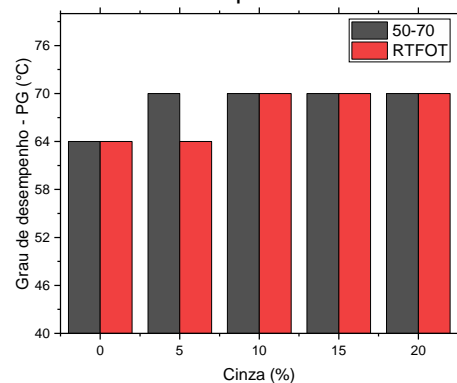
Com 5% de cinza, o ligante sem envelhecimento falhou em 70,4  $^{\circ}\text{C}$ , portanto passou na temperatura de ensaio de 70  $^{\circ}\text{C}$ , porém após o envelhecimento o CAP com 5% de cinza falhou em 69,5  $^{\circ}\text{C}$ , ou seja, a última temperatura alcançada pela amostra envelhecida foi de 64  $^{\circ}\text{C}$ . Dessa forma, a menor entre as duas temperaturas continua sendo 64  $^{\circ}\text{C}$  e o PG com 5% de cinza ainda é 64.

A partir de 10% de cinza o grau de desempenho foi aumentando para PG 70, visto que a temperatura de falha foi superior a 70 °C, tanto para o CAP não envelhecido como para o envelhecido no curto prazo. Nenhuma amostra conseguiu superar os 76 °C.

**Figura 214.** Temp. de falha x cinza (50-70 e RTFOT)



**Figura 215.** Grau de desempenho – PG para alta temperatura



**Tabela 6.** Classificação por grau de desempenho

Amostra	0%	5%	10%	15%	20%
Temperatura (°C) antes do RTFOT, $G^*/\sin(\delta) > 1,0$ kPa	64	70	70	70	70
Temperatura (°C) após RTFOT, $G^*/\sin(\delta) > 2,2$ kPa	64	64	70	70	70
PG (Alta temperatura)	64	64	70	70	70

## 5.4 Caracterização da durabilidade

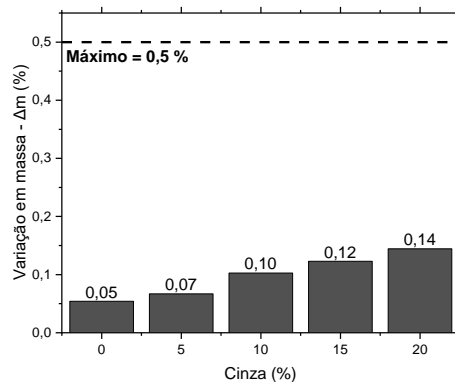
### 5.4.1 Grau de envelhecimento

Durante o ensaio para simular o envelhecimento de curto prazo (RTFOT), foi possível calcular a variação em massa das amostras. Nesse processo, os componentes voláteis e os produtos de reação evaporam e causam uma diminuição de massa, enquanto que o oxigênio reage com a amostra e causa um aumento de massa. Esses efeitos combinados determinam se a amostra possui um ganho geral de massa ou uma perda geral de massa. Amostras com uma porcentagem muito baixa de componentes voláteis geralmente exibem um ganho de massa, enquanto amostras com uma porcentagem alta de componentes voláteis geralmente exibem uma perda de massa (AASTHO, 2017a). O envelhecimento contribui para o enrijecimento do CAP, que pode ser benéfico ao aumentar a resistência às deformações permanentes, porém pode ser prejudicial quando ocorre de forma excessiva, podendo resultar em trincamento por fadiga ou variação térmica (CRAVO, 2016).

A **Figura 216** apresenta o resultado da variação em massa registrada após o ensaio de envelhecimento de curto prazo em função da quantidade percentual de cinza. É possível

observar que há uma perda maior de massa conforme se aumenta a quantidade de cinza, indicando um aumento no grau de envelhecimento após a modificação. Apesar disso, todos os valores estão abaixo do limite máximo de 0,5% estabelecido pela DNIT 095, mostrando que a cinza não comprometeu a durabilidade do CAP. Uma possível explicação para o crescimento da variação em massa está relacionada com a umidade da cinza e a evaporação da água e/ou a degradação da cinza durante o processo de envelhecimento.

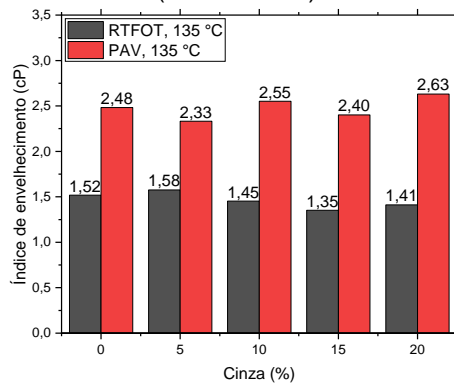
**Figura 216.** Variação em massa após RTFOT



Outra maneira de avaliar o grau de envelhecimento nas propriedades reológicas do CAP pode ser realizada por meio do Índice de envelhecimento, o qual é calculado pelo quociente entre a viscosidade a 135 °C do CAP após envelhecimento e a viscosidade desse CAP antes do envelhecimento (ASUKAR; BEHL; GUNDALIYA, 2016; LUZ, 2019; LIU et. al, 2019).

A **Figura 217** mostra o gráfico do índice de envelhecimento da viscosidade. Se observa que a partir de 10% de cinza, o índice de envelhecimento das amostras modificadas após o RTFOT se torna menor do que o ligante original. Com relação ao índice após o PAV, o índice das amostras modificadas com 5 e 15% foi menor do que o ligante sem modificação. Dessa forma, não se verifica alteração significativa do grau de envelhecimento com a utilização da cinza.

**Figura 217.** Índice de envelhecimento x cinza (Viscosidade)



Outros indicadores que podem ser usados para avaliar o grau de envelhecimento das amostras são a penetração retida e o aumento do ponto de amolecimento. A penetração retida fornece o valor percentual da penetração que fica retida após o envelhecimento do ligante, devendo ser de, no mínimo, 55% para o CAP 50-70. O aumento do ponto de amolecimento fornece a variação do ponto de amolecimento após o envelhecimento e deve ser de, no máximo, 8 °C para o CAP 50-70. Dessa forma, valores fora das especificações indicariam enrijecimento significativo do CAP após o envelhecimento, havendo portanto uma redução da sua durabilidade (LUZ, 2019).

É possível observar na **Figura 79** que a penetração retida das amostras modificadas ficou acima do limite mínimo de 55% e o aumento do ponto de amolecimento (**Figura 81**) ficou abaixo do limite máximo de 8°C, esses resultados fornecem outra indicação de que a modificação com cinza não comprometeu a durabilidade do ligante asfáltico.

## 6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos durante os ensaios físicos de caracterização mostram que a utilização de cinza aumenta a consistência do CAP. A diminuição da penetração em função da quantidade de cinza indica um aumento da rigidez do ligante. O crescimento do ponto de amolecimento mostrou que a modificação aumentou a temperatura na qual o ligante amolece e começa a escoar. Os resultados dos ensaios de penetração e ponto de amolecimento foram utilizados no cálculo do IST. O valor absoluto do IST diminuiu gradativamente com o aumento da quantidade percentual de cinza. Esses resultados indicam uma maior resistência à deformação e às variações de temperatura após a modificação com cinza.

A temperatura do ponto de fulgor do ligante modificado com cinza diminuiu devido à maior quantidade de gases emanados, porém, ficou acima do limite mínimo estabelecido na DNIT 095. Dessa forma, a segurança para armazenamento, transporte, manuseio e aplicação não foi comprometida pela modificação.

A viscosidade do CAP aumentou em função da quantidade percentual de cinza e diminuiu com o aumento da temperatura de ensaio. A variação da viscosidade após a modificação foi maior em 135 °C e diminuiu gradativamente com o aumento da temperatura, tendendo ao valor da viscosidade do CAP não modificado em 177 °C. Esse resultado indica uma maior inclinação da curva de viscosidade das amostras modificadas e evidencia a sua maior variabilidade com o aumento da temperatura. Comportamento semelhante foi observado após o envelhecimento das amostras. O envelhecimento aumentou a viscosidade do CAP e também a sua variabilidade com a temperatura. Todos os valores obtidos para a viscosidade satisfazem as especificações e mostram que a modificação com cinza não afetou negativamente a trabalhabilidade do ligante.

Durante a avaliação da resistência à deformação permanente no DSR, foi observado uma diminuição do módulo complexo ( $G^*$ ) e um aumento do ângulo de fase ( $\delta$ ) em função do incremento da temperatura de ensaio. Esse resultado mostra como o ligante perde elasticidade e rigidez ao ser aquecido e fica evidenciado pela redução do parâmetro  $G^*/\sin(\delta)$  em função da temperatura.

O envelhecimento do ligante aumentou o seu módulo complexo e diminuiu o ângulo de fase. Esse resultado indica que o CAP ganha elasticidade e rigidez ao ser envelhecido. Porém, como evidenciado nos gráficos comparativos de  $G^*$  e  $\delta$  em função da temperatura entre o ligante envelhecido e o não envelhecido, a magnitude da variação desses parâmetros após o envelhecimento é maior nas temperaturas mais baixas e diminui gradativamente com a evolução da temperatura de ensaio. Dessa forma, os parâmetros de rigidez e elasticidade variam a uma taxa maior após o envelhecimento e o ganho de rigidez e elasticidade se tornam



menos significativos nas temperaturas mais altas. Esse resultado pode ser observado pelos gráficos comparativos de  $G^*/\sin(\delta)$ , antes e após o envelhecimento, em função da temperatura. O envelhecimento do ligante provoca um deslocamento das curvas de  $G^*/\sin(\delta)$  para cima e aumentam a sua inclinação, evidenciando a maior variabilidade da resistência à deformação permanente com o aumento da temperatura após o envelhecimento.

O módulo complexo aumentou após a modificação com cinza. Esse aumento foi maior quanto maior a quantidade de cinza na mistura, tornando o ligante mais rígido e consistente. Não foi observado melhora significativa da elasticidade com a modificação. Dessa forma, o aumento da resistência à deformação permanente com a utilização de cinza se deu exclusivamente devido ao ganho de rigidez observado pelo aumento do módulo complexo.

A modificação com cinza provoca o aumento gradativo da magnitude de variação dos parâmetros  $G^*$  e  $G^*/\sin(\delta)$ . Esse resultado evidencia que não só o envelhecimento aumenta a inclinação das curvas de  $G^*$  e  $G^*/\sin(\delta)$  em função da temperatura, mas que a cinza também contribui com a maior variabilidade dos parâmetros reológicos do ligante ao ser aquecido. Dessa forma, a melhora da resistência a deformação permanente após a modificação foi mais significativa nas temperaturas mais baixas.

Devido à maior resistência à deformação permanente após a modificação, a temperatura de falha das amostras modificadas aumentou com o incremento da quantidade de cinza e o grau de desempenho do CAP em altas temperaturas foi alterado a partir da modificação com mais de 10% de cinza, passado de PG 64 para PG 70.

Na avaliação da resistência ao trincamento por fadiga, a diminuição da temperatura de ensaio aumentou o módulo complexo e diminuiu o ângulo de fase. A diminuição do ângulo de fase se mostrou um fator positivo pois aumentou a capacidade do CAP retornar ao seu estado original ao ser deformado, porém o aumento do módulo complexo resulta em um ligante mais rígido e menos susceptível a deformações. A impossibilidade de se deformar provoca o acúmulo de tensões internas que podem ser dissipadas em forma de trincas conforme se aumenta o valor do trabalho dissipado por ciclo. A utilização da cinza contribuiu com uma pequena redução do ângulo de fase em temperaturas mais baixas, mas aumentou significativamente o módulo complexo. Como resultado, a curva de  $G^*.\sin(\delta)$  em função da temperatura foi deslocada para cima, aumentando o trabalho dissipado por ciclo. Dessa forma, houve uma diminuição da resistência do CAP ao trincamento por fadiga devido ao uso da cinza e teve como principal causa o aumento de sua rigidez. Apesar do resultado negativo, todos os valores obtidos para o parâmetro  $G^*.\sin(\delta)$  foram inferiores ao limite máximo estabelecido nas especificações Superpave em todas as temperaturas de ensaio.

Os valores de penetração retida, aumento do ponto de amolecimento e variação em massa estão dentro dos limites especificados na DNIT 095 e o índice de envelhecimento da viscosidade se manteve praticamente constante após a modificação. Esses são indicadores de que o uso da cinza não comprometeu a durabilidade do ligante asfáltico.

Como sugestão para estudos futuros, recomenda-se a realização do ensaio de fluência em viga (BBR) para caracterização da rigidez e resistência ao trincamento térmico em baixas temperaturas. Recomenda-se também a realização do ensaio de tração direta (DT) para determinar a tensão de falha do CAP em baixas temperaturas e prever a temperatura na qual ocorrerá fissuração térmica. Os dois ensaios podem ser usados para determinar o grau de desempenho (Performance Grade, PG) do ligante em baixas temperaturas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M320**: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. 05 ed. Washington: AASHTO, 2007a. 8 p.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO R28**: Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). 06 ed. Washington: AASHTO, 2007b. 9 p.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO R29**: Standard Practice for Grading or Verifying the Performance Grade of an Asphalt Binder. 08 ed. Washington: AASHTO, 2012. 5 p.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T240**: Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). 13 ed. Washington: AASHTO, 2017a. 12 p.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T313**: Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). 12 ed. Washington: AASHTO, 2016a. 22 p.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T314**: Standard Method of Test for Determining the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension (DT). 12 ed. Washington: AASHTO, 2016b. 18 p.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T315**: Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). 12 ed. Washington: AASHTO, 2016c. 33 p.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T316**: Standard method of test for viscosity determination of asphalt binder using rotational viscometer. 13 ed. Washington: AASHTO, 2017b. 5 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5**: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. 19 ed. West Conshohocken: ASTM International, 2019a. 4 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D36**: Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). 14E1 ed. West Conshohocken: ASTM International, 2014. 4 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D92**: Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester. 18 ed. West Conshohocken: ASTM International, 2018. 11 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2872**: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven. 19 ed. West Conshohocken: ASTM International, 2019b. 6 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4402**: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. 15 ed. West Conshohocken: ASTM International, 2015a. 4 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6373**: Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder. 16 ed. West Conshohocken: ASTM International, 2016a. 6 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6521**: Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). 19 ed. West Conshohocken: ASTM International, 2019c. 6 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6648**: Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). 08 ed. West Conshohocken: ASTM International, 2016b. 15 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6723**: Standard Test Method for Determining the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension (DT). 12 ed. West Conshohocken: ASTM International, 2012. 12 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7175**: Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. 15 ed. West Conshohocken: ASTM International, 2015b. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7208**: Materiais betuminosos para emprego em pavimentação. Rio de Janeiro: ABNT, 1990. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11314**: Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 16 p.

ARABANI, Mahyar; TAHAMI, Seyed Amid. Assessment of mechanical properties of rice husk ash modified asphalt mixture. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 149, p.350-358, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.127>.

ASUKAR, Shikha D; BEHL, Ambika; GUNDALIYA, P. J. Utilization of lignin as an antioxidant in asphalt binder. **International Journal of Innovative Research in Technology**, [s.l.], v. 2, n. 12, p.198-207, maio 2016. Disponível em: <[http://ijirt.org/master/publishedpaper/IJIRT143626\\_PAPER.pdf](http://ijirt.org/master/publishedpaper/IJIRT143626_PAPER.pdf)>. Acesso em: 19 out. 2019.

BARDINI, Vivian Silveira dos Santos. **Estudo de viabilidade técnica da utilização de cinzas da queima da casca de Pinus em obras de pavimentação asfáltica**. 2008. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Infra-estrutura de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-03022009-095000/pt-br.php>>. Acesso em: 19 out. 2019.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica**: Formação básica para engenheiros. 3. ed. Rio de Janeiro: Abeda, 2008. 504 f. Disponível em: <<http://www.abeda.org.br/livro-pavimentacao/>>. Acesso em: 18 out. 2019.

BLÁZQUEZ, Luis Bañón; GARCÍA, José Francisco Beviá. **Manual de carreteras**. Volumen I: elementos y proyecto. Alicante: Ortiz e Hijos, Contratista de Obras, S.a., 2000a. 1 v. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10045/1788>>. Acesso em: 19 out. 2019.

BLÁZQUEZ, Luis Bañón; GARCÍA, José Francisco Beviá. **Manual de carreteras**. Volumen II: construcción y mantenimiento. Alicante: Ortiz e Hijos, Contratista de Obras, S.a., 2000b. 2 v. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10045/1787>>. Acesso em: 19 out. 2019.

BRANCO, Fernando; PEREIRA, Paulo; SANTOS, Luís Picado. **Pavimentos Rodoviários**. 5. ed. Coimbra: Almedina, 2016. 388 p.

BRINGEL, Raquel Moraes. **Estudo químico e reológico de ligantes asfálticos modificados por polímeros e aditivos**. 2007. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química Orgânica, Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/9529>>. Acesso em: 19 out. 2019.

CARO, Silvia et al. Studying the impact of biomodifiers produced from agroindustrial wastes on asphalt binders. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 126, p.369-380, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.043>.

FLASH & fire point test for asphalt by cleveland open cup. 2013. Disponível em: <<https://civilengineerspk.com/transportation-engineering-experiments/exp-6-flash-fire-point/>>. Acesso em: 19 out. 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Boletim estatístico**. Brasília: CNT, Publicação: fevereiro, 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Relatório gerencial**: Pesquisa CNT de rodovias. Brasília: CNT, 2018.

CRAVO, Margareth Carvalho Coutinho. **Efeitos do Envelhecimento Térmico e Fotoquímico em Ligantes Asfálticos, Mástique e Matriz de Agregados Finos**. 2016. 251 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/391-2016/4708-margareth-carvalho-coutinho-cravo>>. Acesso em: 19 out. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES (Brasil). Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: IPR 719, 2006. 274 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/publicacoes>>. Acesso em: 19 out. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 095**: Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material. Rio de Janeiro: Ipr, 2006. 6 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-material-em/especificacao-de-materia>>. Acesso em: 19 out. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 129**: Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico – Especificação de material. Rio de Janeiro: Ipr, 2011. 4 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-material-em/especificacao-de-materia>>. Acesso em: 18 out. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 131**: Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola -

Método de ensaio. Rio de Janeiro: Ipr, 2010. 6 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/metodo-de-ensaio-me>>. Acesso em: 18 out. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 155: Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: Ipr, 2010. 7 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/metodo-de-ensaio-me>>. Acesso em: 18 out. 2019.

FAXINA, Adalberto Leandro. **Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha.** 2006. 308 f. Tese (Doutorado) - Curso de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-29052007-170231/pt-br.php>>. Acesso em: 18 out. 2019.

GAMA, Denneyele Alves. **Avaliação do potencial do uso do etileno acetato de vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista em misturas asfálticas.** 2013. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/3700>>. Acesso em: 19 out. 2019.

HAN, Zhenqiang et al. Study on the optimum rice husk ash content added in asphalt binder and its modification with bio-oil. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 147, p.776-789, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.004>.

MORILHA JUNIOR, Armando. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas.** 2004. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/87049>>. Acesso em: 19 out. 2019.

LEITE, Leni Figueiredo Mathias. **Estudos reológicos de cimentos asfálticos.** 1990. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/3951>>. Acesso em: 18 out. 2019

LIU, Shengjie et al. Evaluation of the ageing behaviour of waste engine oil-modified asphalt binders. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 223, p.394-408, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.020>.

LUCENA, Maria da Conceição Cavalcante. **Caracterização química e reológica de asfaltos modificados por polímeros**. 2005. 163 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Química Inorgânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/2080>>. Acesso em: 19 out. 2019.

LUZ, Priscila Maria Sousa Gonçalves. **Avaliação reológica do ligante asfáltico 50/70 modificado com lignina das madeiras pinus e eucalipto**. 2019. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/3438>>. Acesso em: 19 out. 2019.

PILATI, Fernanda. **Análise dos efeitos da borracha moída de pneus e do resíduo de óleo de xisto sobre algumas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas**. 2008. 192 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Infra-estrutura de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-14062008-202738/pt-br.php>>. Acesso em: 19 out. 2019.

PINHEIRO, Jorge Henrique Magalhães. **Incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias (Processos úmido e seco)**. 2004. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/4898>>. Acesso em: 19 out. 2019.

PINTO, Isaac Eduardo; PINTO, Salomão. **Pavimentação Asfáltica: Conceitos Fundamentais sobre Materiais e Revestimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro: Ltc, 2018. 269 p.

READ, John; WHITEOAK, David. **The Shell Bitumen Handbook**. 5. ed. Londres: Thomas Telford, 2003. 460 p.

ROBERTS, Freddy et al. **Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction**. 2. ed. Lanham: National Asphalt Pavement Association, 1996. 585 p.



SANTOS, Nataliene Silva dos; RODRIGUES, John Kennedy Guedes; MENDONÇA, Ana Maria Gonçalves Duarte. Efeito da adição de lignina kraft proveniente da madeira de eucalipto na reologia do CAP 50/70. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s.l.], v. 23, n. 3, p.1-13, 18 out. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0492>.

SILVA, Leticia Social da. **Contribuição ao estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos: Influência da adição de polímeros e comportamento frente a radiação UV**. 2005. 155 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/7349>>. Acesso em: 18 out. 2019.

TAIRA, Claudio. **Avaliação do desempenho em laboratório de misturas asfálticas densas utilizando asfalto convencional (CAP-20) e asfalto modificado com polímero SBS (BETUFLEX B 65/60)**. 2001. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-09052016-111805/pt-br.php>>. Acesso em: 18 out. 2019.

TONIAL, Ilonir Antonio. **Influência do envelhecimento do revestimento asfáltico na vida de fadiga de pavimentos**. 2001. 248 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/dissertacoes-de-mestrado/101-2001/4509-ilonir-antonio-tonial>>. Acesso em: 20 out. 2019.

XUE, Yongjie et al. Effects of two biomass ashes on asphalt binder: Dynamic shear rheological characteristic analysis. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 56, p.7-15, abr. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.075>.