



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Luana Schuster

**Avaliação da contribuição da lã de aço associada ao nanotubo de carbono na
reparação de danos em misturas asfálticas submetidas ao aquecimento por
micro-ondas**

FLORIANÓPOLIS

2020

Luana Schuster

**Avaliação da contribuição da lã de aço associada ao nanotubo de carbono na
reparação de danos em misturas asfálticas submetidas ao aquecimento por
micro-ondas**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.
Orientador: Prof. Dr. João Victor Staub de Melo

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Schuster, Luana

Avaliação da contribuição da lã de aço associada ao nanotubo de carbono na reparação de danos em misturas asfálticas submetidas ao aquecimento por micro-ondas / Luana Schuster ; orientador, João Victor Staub de Melo, 2020.

213 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Fadiga. 3. Reparação. 4. Misturas asfálticas. 5. Healing. I. Melo, João Victor Staub de. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Luana Schuster

**Avaliação da contribuição da lã de aço associada ao nanotubo de carbono na
reparação de danos em misturas asfálticas submetidas ao aquecimento por
micro-ondas**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Francisco Thiago Sacramento Aragão, *Ph.D.*
COPPE/UFRJ

Luis Alberto Herrmann do Nascimento, *Ph.D.*
CENPES/Petrobras

Prof. Philippe Jean Paul Gleize, *D.Sc.*
PPGEC/UFSC

Certificamos que esta é a versão **original e final** do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Prof. Poliana Dias de Moraes, *D.Sc.*
Coordenadora do Programa

Prof. João Victor Staub de Melo, *D.Sc.*
Orientador

Florianópolis, 08 de julho de 2020.

Dedico este trabalho aos meus pais, Marinês e Helio, e à minha irmã Tauana. Obrigada por alicerçar meu caminho com carinho, respeito e amor!

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Marinês e Helio, pelos exemplos diários e apoio incondicional. Obrigada por me impulsionar e incentivar a viver meus sonhos. À minha irmã Tauana, por ser meu maior exemplo de dedicação e comprometimento. Por me lembrar constantemente que a vida se torna mais bonita quando temos com quem contar!

Ao professor João Victor Staub de Melo, pela orientação e confiança depositada ao longo deste trabalho, contribuindo para o meu desenvolvimento pessoal e profissional. Agradeço também pelo apoio prestado na condução dos ensaios, enquanto realizava o mestrado concomitantemente ao trabalho.

Aos professores Glicério Trichês e Liseane Padilha Thieves, quer seja pelos conhecimentos teóricos repassados ao longo das disciplinas do mestrado ou pelas experiências compartilhadas nas conversas informais. Também à professora e coordenadora do Laboratório de Pavimentação (LabPav) da Universidade Federal de Santa Catarina, Luciana Rohde, que mesmo durante um período de adaptação do espaço físico do laboratório mostrou-se sempre solícita, paciente e muito gentil.

Aos professores Philippe Jean Paul Gleize, Francisco Thiago Sacramento Aragão e Luis Alberto Herrmann do Nascimento, por gentilmente aceitarem o convite para compor a banca avaliadora, contribuindo com a construção deste trabalho.

Ao professor Joe Arnaldo Vilena Del Caprio, da Universidade Federal do Paraná, pela paciência e auxílio irretocável nos ensaios realizados no Laboratório de Pavimentação Armando Martins Pereira (LAMP), bem como pelo conhecimento repassado.

Aos colegas e amigos da Infraestrutura e Geotecnia e do LabTrans, com quem muito aprendi. Obrigada por (cada um ao seu modo) fazer desta uma caminhada mais leve, seja pelos momentos de descontração, de trabalho ou de estudo. Em especial à Cheila Beutler, Katia Bohn, Gabriela Hammes e Bruna Gracioli: obrigada, meninas, por compartilharem comigo as angústias e os momentos felizes da pós-graduação! Também ao Bruno Bica, pela amizade ao longo do mestrado e pela companhia em todos os “vamos tomar um café?”.

Às famílias Tonin e Schuster, pois não poderia fazer parte de um círculo de pessoas mais especial. À Scheila Krenkel, pelas valiosas dicas e acolhimento durante o mestrado. Aos meus amigos de toda a vida, que, mesmo longe, nos inúmeros detalhes se mostravam sempre presentes!

Ao Nanotec e ao laboratorista André Roos, pelo auxílio nos ensaios de condutividade térmica das amostras de MAF. Ao Laboratório Polo, pelo corte dos corpos de prova de MAF, bem como ao Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) pela Microscopia Eletrônica de Varredura e ao Laboratório de Controle de Polimerização (LCP), pela análise térmica dos materiais.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro concedido durante parte do mestrado e à Rede Temática do Asfalto/Petrobrás, pelos investimentos realizados no LabPav da UFSC.

Enfim, a todas as pessoas que – de uma forma ou outra – contribuíram na construção desse estudo.

“And when at last the work is done
don't sit down
it's time to dig another one.”
(Waters, Gilmour e Wright, 1973)

RESUMO

Materiais autorreparadores correspondem àqueles cuja propriedade, intrínseca ou não, de regeneração ao dano poderá ser desencadeada em determinado momento de sua vida de serviço. Esta propriedade está presente também nos materiais asfálticos, uma vez que – devido a suas características reológicas – os ligantes asfálticos apresentam potencial autorreparador. Este conceito tem especial importância na pavimentação asfáltica, podendo ser aplicado em pavimentos acometidos pelo trincamento por fadiga, fazendo com que as fissuras oriundas do carregamento cíclico promovido pelo tráfego possam ser seladas e, conseqüentemente, a vida útil do pavimento possa ser ampliada. Porém, essa “cicatrização” ocorre de forma lenta, sendo sensível a variações de temperatura e à frequência de carregamento (tempos de repouso). Desta forma, este estudo avaliou o reforço de misturas asfálticas com materiais capazes de potencializar o efeito regenerativo de uma mistura de referência, modificando-a através da incorporação de fibras de lã de aço associadas a nanotubos de carbono (NTC) e submetendo-a ao aquecimento por meio de micro-ondas. Para determinar os teores ótimos de fibras de lã de aço e NTC foram avaliadas as alterações nos parâmetros térmicos e elétricos da mistura asfáltica fina (MAF). Obtidos os teores de material a ser incorporado (16% de lã de aço e 1% de NTC, sobre a massa de ligante asfáltico), procedeu-se a dosagem da mistura de referência (M_{Ref}) e da mistura modificada (M_{Modif}), permitindo estabelecer comparativos em termos de desempenho mecânico, reológico e – sobretudo – da capacidade de reparação e da extensão da vida de fadiga de ambas. Ao final da análise, os dados laboratoriais possibilitaram a realização de uma análise computacional do desempenho das misturas elaboradas em duas estruturas de pavimento hipotéticas. Verificou-se que as fibras metálicas e os nanotubos de carbono promoveram a redução da resistência elétrica do material asfáltico, além de aumentar sua capacidade de condução térmica. Em termos de desempenho mecânico, as fibras de lã de aço e os nanotubos de carbono incrementaram o desempenho da mistura asfáltica quanto à deformação permanente, promovendo uma redução de aproximadamente 35% no afundamento em trilha de roda comparativamente à mistura de referência. Na avaliação das propriedades reológicas, as incorporações resultaram em um aumento do módulo dinâmico (em frequências inferiores a 100 Hz) e uma redução no ângulo de fase (a partir da temperatura de 10 °C). Em relação à fadiga, ambas as misturas apresentaram um desempenho bastante próximo. Porém, ao avaliar a capacidade de reparação, verificou-se que: (a) em relação ao módulo dinâmico, ambas as misturas apresentaram o mesmo nível de reparação, contudo, a mistura de referência apresentou um valor de perda do módulo dinâmico recuperado a cada 100 ciclos de carregamento 64% maior que a mistura modificada; (b) a mistura modificada apresentou um incremento no número de ciclos de carregamento superior ao da mistura de referência, atingindo valores de sobrevivência de 45,5% e 30,4%, respectivamente.

Palavras-chave: Fadiga. Reparação. *Healing*. Misturas Asfálticas. Lã de aço. Nanotubo de Carbono. Micro-ondas.

ABSTRACT

Self-healing materials correspond to those whose damage healing property, intrinsic or not, may be activated at a certain point in their service life. This property is also present in asphalt materials, since – due to their rheological characteristics – asphalt binders have a self-healing potential. This concept is especially important in asphalt pavement, and can be applied in pavements affected by fatigue cracking, making the cracks promoted by traffic loading to be sealed and, consequently, the pavement's life can be extended. However, this healing occurs slowly, being sensitive to temperature variations and the loading frequency (rest times). In this way, this study evaluated the reinforcement of asphalt mixtures with materials capable of enhancing the regenerative effect of a reference mixture, modifying it through the incorporation of steel wool fibers associated with carbon nanotubes (NTC) and submitting it to the heating by microwave. To determine the optimum levels of steel wool fibers and NTC, changes in the thermal and electrical parameters of the fine asphalt mixture were evaluated. After obtaining the contents of material to be incorporated (20% steel wool and 1% NTC, by asphalt binder weight), the reference mixture (M_{Ref}) and modified mixture (M_{Modif}) were designed, allowing to establish comparisons in terms of mechanical, rheological performance, and – above all – the healing capacity and fatigue's life extension of both. At the end of the analysis, the laboratory data made it possible to carry out a computational analysis of the mixtures' performance elaborated on two hypothetical pavement structures. It was found that metallic fibers and carbon nanotubes reduced the electrical resistance of the asphalt material and increased its thermal conduction capacity. In terms of mechanical performance, steel wool fibers and carbon nanotubes increased the rutting resistance, promoting a reduction of approximately 35% in rutting compared to the reference mixture. In evaluating the rheological properties, the incorporations resulted in an increase in the dynamic modulus (at frequencies below 100 Hz) and a reduction in the phase angle (from a temperature of 10°C). Regarding fatigue, both mixtures performed very closely. However, when evaluating the healing capacity, it was found that: (a) in relation to the dynamic modulus, both mixtures has the same level of repair, however, the reference mixture has a loss value of the recovered dynamic modulus at each 100 loading cycles 64% longer than the modified mixture; (b) the modified mixture has an increase in the number of loading cycles greater than that of the reference mixture, reaching survival values of 45.5% and 30.4%, respectively.

Keywords: Fatigue. Healing. Asphalt Mixtures. Steel Wool. Carbon Nanotube. Microwave.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação esquemática do modo de ativação de: (a) sistemas à base de cápsulas, (b) sistema vascular e (c) sistema intrínseco.	35
Figura 2 - Relação entre a taxa de reparo inicial e a energia superficial apolar e polar, respectivamente.....	42
Figura 3 - Comparativo entre o tempo de reparo (em termos de resistência à fratura) para o mástique contendo ligante puro e modificado por polímero SBS.	44
Figura 4 – Efeito da incorporação de períodos de repouso no módulo de cisalhamento dinâmico.....	46
Figura 5 - Níveis de recuperação no ensaio flexão em três pontos para diferentes tempos (min) e temperaturas (°C).	47
Figura 6 - Efeito do envelhecimento na taxa de recuperação ao dano por fadiga de ligantes com grau de desempenho (<i>Performance grade – PG</i>) a altas e baixas temperaturas, respectivamente, de: 64-28 e 70-28.....	49
Figura 7 - Representação esquemática de nanotubos de carbono de paredes simples e paredes múltiplas, respectivamente.....	51
Figura 8 - Alteração na condutividade elétrica de um ligante asfáltico modificado com diferentes teores de NTC (0,5%, 1,0%, 1,5%, 3,0% e 5,0%) em termos de (a) frequência de ensaio e (b) proporção de NTC utilizada na modificação.....	53
Figura 9 - Aumento na temperatura de ligantes asfálticos contendo diferentes teores de nanotubos de carbono, em função do tempo de radiação.....	54
Figura 10 - Representação esquemática da associação de fibras condutivas na mistura asfáltica.....	56
Figura 11 - Representação esquemática de um caminho condutivo descontínuo (a) e (b) formado por fibras ou fíleres; (c) caminho condutivo potencializado pela combinação dos materiais (efeito ponte).....	57
Figura 12 – Imagem de tomografia computadorizada (<i>nano scan</i>) das partículas no interior de uma amostra ¹ de material asfáltico, onde: (a) porcentagem total de fibras e (b) apenas as fibras conectadas.....	58
Figura 13 - Comparativo entre (a) micro-ondas e (b) termo indutor no que tange à eficiência na elevação da temperatura, em função do tempo de aquecimento para diferentes teores de incorporação.....	60

Figura 14 - Representação do efeito de autorreparação por termo indução.....	63
Figura 15 - Aspecto das fibras incorporadas na mistura.....	65
Figura 16 - Variação no comprimento das fibras após a mistura.	66
Figura 17 - Relação entre a perda de partículas por dano e volume de vazios, para diferentes teores de fibras metálicas.....	67
Figura 18 - Mecanismo de atuação de agentes rejuvenescedores encapsulados.	68
Figura 19 - Fases de comportamento RDEC.....	72
Figura 20 - Fluxograma geral do plano experimental.	79
Figura 21 - Composição granulométrica e respectivos pontos de controle.	82
Figura 22 - Distribuição granulométrica adaptada à MAF, em comparação à composição original para a mistura asfáltica, para a série de peneiras ASTM.....	87
Figura 23 - Características geométricas dos moldes utilizados para confecção dos corpos de prova de MAF.	88
Figura 24 - Amostras extraídas do terço médio dos corpos de prova de MAF e representação do tubo de nylon utilizado para serragem das mesmas.	88
Figura 25 - Fluxograma representativo da etapa de otimização das incorporações (lã de aço e NTC) pelos critérios de parâmetros elétricos e térmicos da MAF.....	89
Figura 26 – Conforme sequência: (1) misturador de alto cisalhamento Silverson L5M-A com controle da temperatura, (2) aspecto da amostra após o processo de modificação, no interior do molde e (3) amostra partida, na qual é possível observar a deposição das fibras metálicas incorporadas.	90
Figura 27 - Equipamento de medição da condutividade térmica das amostras da MAF. A sequência ilustra a disposição da amostra sobre o sensor do equipamento, seguida pela colocação do peso metálico sobre a amostra.	92
Figura 28 - Fluxograma representativo das etapas e validação do procedimento de dosagem para a mistura de referência e modificada.....	95
Figura 29 - Sequência das etapas executadas para confecção dos corpos de prova referentes à dosagem da mistura modificada e comparativo entre CPs dosados (última foto).	96
Figura 30 - Fluxograma representativo das etapas de avaliação do desempenho da mistura de referência e da mistura modificada.	97
Figura 31 - Distribuição dos pontos de controle das medidas de afundamento na superfície da placa (espaçamento em centímetros).	99

Figura 32 - Esquema de obtenção dos corpos de prova para ensaio de módulo dinâmico e fadiga (em cm).....	100
Figura 33 - Recuperação do módulo dinâmico e acréscimo no número de ciclos de carregamento após a execução do protocolo de reparação.	105
Figura 34 - Esquema representativo do ponto aproximado de controle da temperatura do corpo de prova no interior do forno micro-ondas.	107
Figura 35 - Representação esquemática da configuração de carregamento do semieixo de roda dupla.....	109
Figura 36 - Estrutura de pavimento (trecho de Araranguá/SC) utilizada para avaliação mecanicista.....	111
Figura 37 - Estrutura de pavimento (trecho de Urubici/SC) utilizada para avaliação mecanicista.....	111
Figura 38 – Imagens geradas a partir da microscopia eletrônica de varredura, apresentando o aspecto superficial e forma das fibras de lã de aço. Aproximações de 50 e 800 vezes, respectivamente.	115
Figura 39 - Micrografia dos nanotubos de carbono utilizando a técnica de alto vácuo, com ampliação de 15.000 e 30.000 vezes e marca de escala de 1 μm e 100 nm (respectivamente).....	116
Figura 40 – Curvas TG obtidas para a lã de aço e o NTC, quando submetidos a temperaturas de até 500 $^{\circ}\text{C}$ e 800 $^{\circ}\text{C}$, respectivamente.....	117
Figura 41 - Processo manual de corte dos rolos de lã de aço e aspecto final do material, para posterior armazenamento.....	119
Figura 42 - Avaliação da densidade geométrica das amostras de MAF contendo os diferentes teores de fibras de lã de aço.....	120
Figura 43 - Variação nos valores de resistência elétrica média para amostras de MAF contendo diferentes teores de fibra de lã de aço, calculados utilizando multímetro digital sob corrente contínua.....	121
Figura 44 - Variação da temperatura ambiente (Δt) durante a realização do ensaio de condutividade térmica da MAF para as variações no teor de lã de aço propostas. .	122
Figura 45 - Comportamento das amostras de MAF contendo diferentes teores de fibra de lã de aço em termos de condutividade térmica (W/mK).	123
Figura 46 - Variação da densidade geométrica (g/cm^3) dos pares de amostra de MAF contendo os diferentes teores de NTC associados a 16% de lã de aço.	125

Figura 47 - Resistência elétrica para amostras de MAF contendo 16% de fibra de lã de aço e diferentes teores de NTC, obtidos através de multímetro digital.	126
Figura 48 - Avaliação da condutividade térmica das amostras de MAF para os teores propostos de NTC, associados a 16% de fibra de lã de aço.....	127
Figura 49 - Representação gráfica da redução dos valores de G_{mm} com o aumento dos teores de ligante asfáltico ensaiados para a mistura de referência e modificada, conforme ASTM D 2041.	128
Figura 50 - Valores de viscosidade aparente Brookfield obtidos para o ligante de referência e o ligante modificado com 0,25%, 0,50%, 0,75% e 1,0% de NTC, para as temperaturas de 135 °C, 150 °C e 175 °C.	129
Figura 51 - Curva de compactação para os diferentes teores de ligante asfáltico avaliados na dosagem da mistura de referência.	132
Figura 52 - Curva de compactação obtida no procedimento de dosagem da mistura asfáltica modificada (16% de lã de aço e 1% de NTC).	133
Figura 53 – Etapas de confecção e ensaio das placas: (1ª) placas relativas à mistura modificada, logo após o processo de compactação e (2ª) placa sendo ensaiada....	134
Figura 54 - Comparativo, em termos de deformação permanente, para as diferentes misturas avaliadas (M_{Ref} , M_{Modif} (4,65%) e M_{Modif} (6,53%)), com o aumento no número de ciclos de carregamento.	137
Figura 55 – Serragem das placas de fadiga, obtenção dos corpos de prova e ensaio para avaliação do comportamento reológico da amostra, respectivamente.....	140
Figura 56 - Curvas isotérmicas da mistura asfáltica de referência, para as diferentes temperaturas ensaiadas.	143
Figura 57 - Curvas isotérmicas da mistura asfáltica modificada, para as diferentes temperaturas ensaiadas.	144
Figura 58 - Curvas mestras relativas às misturas de referência e modificada, para uma temperatura de referência de 20 °C.	145
Figura 59 - Curvas isócronas da mistura asfáltica de referência, para as diferentes frequências estudadas.....	146
Figura 60 - Curvas isócronas da mistura asfáltica modificada, para as diferentes frequências estudadas.....	147
Figura 61 - Espaço de Black relativo à mistura de referência.....	150
Figura 62 - Espaço de Black relativo à mistura modificada.....	150
Figura 63 - Plano Cole-Cole obtido para a mistura asfáltica de referência.....	154

Figura 64 - Plano Cole-Cole obtido para a mistura asfáltica modificada.....	154
Figura 65 - Calagem do modelo Huet-Sayegh aos dados experimentais relativos à mistura de referência.	156
Figura 66 - Calagem do modelo Huet-Sayegh aos dados experimentais relativos à mistura modificada.	156
Figura 67 - Superfície do um corpo de prova (5,08 x 6,35 x 38,1 cm) utilizado na análise microscópica da distribuição das fibras metálicas.	158
Figura 68 - Aspecto superficial do corpo de prova prismático relativo à M_{Modif} , bem como da verificação da dispersão das fibras metálicas após o corte da amostra....	159
Figura 69 - Temperatura interna máxima obtida para amostra da mistura de referência, aquecida durante o intervalo de 1 minuto, atingindo 48,9 °C, no centro do corpo de prova.	160
Figura 70 - Comparativo entre o aquecimento da face interna das amostras de concreto asfáltico da mistura de referência e modificada, para diferentes tempos de aquecimento em micro-ondas.	162
Figura 71 - Comparativo entre curvas de fadiga originais para a mistura de referência e modificada.	165
Figura 72 - Representação do desenvolvimento de microfissuras no interior da mistura de referência, devido aos ciclos de carregamento.....	166
Figura 73 - Representação do desenvolvimento de microfissuras no interior da mistura modificada, devido aos ciclos de carregamento, e do feito dissipador produzido pela lâ de aço.....	167
Figura 74 - Recuperação do módulo dinâmico dos corpos de prova da mistura de referência (identificados no eixo das abscissas) após o processo de reparação....	172
Figura 75 - Recuperação do módulo dinâmico dos corpos de prova da mistura modificada (identificados no eixo das abscissas) após o processo de reparação. ..	172
Figura 76 - Comparativo entre as curvas de fadiga da mistura de referência, prévia e posteriormente o procedimento de reparação.	175
Figura 77 - Comparativo entre as curvas de fadiga da mistura modificada, prévia e posteriormente o procedimento de reparação.	175
Figura 78 - Deformação específica obtida na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico (15 cm) para Araranguá/SC, considerando as misturas de referência e modificada.....	181

Figura 79 - Comparativo entre o desempenho da mistura de referência e da mistura modificada, com e sem reparação, para 15 cm de espessura de revestimento (Araranguá/SC).....	183
Figura 80 - Deformação específica obtida na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico (6 cm) para Urubici/SC, considerando as misturas de referência e modificada.	184
Figura 81 - Comparativo entre o desempenho da mistura de referência e da mistura modificada, com e sem reparação, para 6 cm de espessura de revestimento (Urubici/SC).	185

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resultados de autorreparação para mistura asfáltica com incorporação de pó de ferro nos diferentes condicionamentos.	61
Quadro 2 - Filtragem das características de incorporações, tipo de materiais, teores e mecanismo de aquecimento verificados na literatura.....	76
Quadro 3 - Propriedades do ligante asfáltico conforme laudo do fornecedor.	80
Quadro 4 - Resumo das condições de ensaio de módulo dinâmico e resistência à fadiga.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos de caracterização da capacidade reparadora de materiais asfálticos.	40
Tabela 2 - Comparativo entre parâmetros elétricos e térmicos de diferentes tipos de incorporações em relação ao agregado pétreo e ao ligante asfáltico.	55
Tabela 3 - Velocidade média de aquecimento superficial variando a distância entre a bobina e a amostra.	64
Tabela 4 - Prós e contras dos diferentes mecanismos ativadores da capacidade de autorreparação.	69
Tabela 5 - Síntese das temperaturas de aquecimento por indução eletromagnética e por meio de micro-ondas observadas na literatura.	70
Tabela 6 - Porcentagens de material passante para a série de peneiras ASTM.	82
Tabela 7 - Porcentagem de material passante que compõe a curva granulométrica da MAF e respectivas peneiras (Série ASTM).	86
Tabela 8 - Fracionamento dos agregados que compuseram as misturas asfálticas dosadas.	93
Tabela 9 - Requisitos volumétricos para validação da dosagem Superpave, considerando diâmetro máximo dos agregados de 19,1 mm.	94
Tabela 10 – Camadas, materiais e espessuras que compõe as estruturas do pavimento dos trechos estudados para a BR 101 (Araranguá/SC) e para a SC 360 (Urubici/SC).	110
Tabela 11 - Parâmetros elásticos (módulo resiliente e coeficiente de Poisson) das camadas constituintes da estrutura analisada.	112
Tabela 12 - Resumo da caracterização dos agregados pétreos utilizados em camada de rolamento, intervalos de aceitação (Superpave) e normativas empregadas.	113
Tabela 13 - Valores médios da G_{mm} (g/cm^3) para as variações no teor de ligante asfáltico, de acordo com a normativa ASTM D 2041.	128
Tabela 14 - Valores de viscosidade aparente Brookfield (Poise) e temperaturas de usinagem e compactação (valor intermediário da faixa) para o ligante asfáltico de referência e modificado com 0,25%, 0,50%, 0,75% e 1,0% de NTC.	130
Tabela 15 - Critérios volumétricos estabelecidos pela metodologia Superpave para misturas submetidas a alto volume de tráfego e respectivos resultados para mistura referência e modificada (16% de lâ de aço e 1% de NTC).	131

Tabela 16 - Volume de vazios medido para as 6 placas de deformação permanente confeccionadas.	135
Tabela 17 - Medidas de afundamento para os conjuntos de placas (lado direito e lado esquerdo) referentes à mistura de referência e à mistura modificada (nos dois teores propostos: 4,65% e 6,53%).	136
Tabela 18 - Valores de módulo dinâmico (MPa) obtidos para a mistura de referência, para as faixas de frequência e temperatura estudadas.	141
Tabela 19 - Valores de módulo dinâmico (MPa) obtidos para a mistura modificada, nas faixas de frequência e temperatura estabelecidas.	142
Tabela 20 – Suscetibilidade cinética das misturas referência e modificada para as diferentes temperaturas ensaiadas: inclinação das curvas analisadas.	144
Tabela 21 - Perda no módulo dinâmico observada para uma amplitude de temperatura de 0 °C a 30 °C, considerando a mistura de referência e a mistura modificada.	148
Tabela 22 - Variação do ângulo de fase medido em função da temperatura (°C), para o espectro de frequências ensaiado. Valores relativos à mistura de referência e modificada.	149
Tabela 23 - Valores de módulo de perda – E2 (MPa) obtidos para a mistura de referência, nas diferentes temperaturas e frequências estudadas.	152
Tabela 24 - Valores de módulo de armazenamento – E1 (MPa) obtidos para a mistura de referência, nas diferentes temperaturas e frequências estudadas.	152
Tabela 25 - Valores de módulo de perda – E2 (MPa) obtidos para a mistura modificada, nas diferentes temperaturas e frequências estudadas.	153
Tabela 26 - Valores de módulo de armazenamento – E1 (MPa) obtidos para a mistura modificada, nas diferentes temperaturas e frequências estudadas.	153
Tabela 27 - Parâmetros obtidos com o software Viscanalyse, referentes ao modelo Huet-Sayegh, contemplando a mistura de referência e a mistura modificada.	155
Tabela 28 - Acréscimo da temperatura interna máxima das amostras relativas à mistura de referência e modificada, com o aumento do tempo de aquecimento no micro-ondas.	161
Tabela 29 – Volume de vazios obtido após a triagem das amostras da mistura de referência e modificada, respectivamente.	163
Tabela 30 - Resultados obtidos no ensaio de fadiga para a mistura de referência e à mistura modificada, respectivamente.	164

Tabela 31 - Avaliação da mistura de referência quanto ao módulo dinâmico e número de ciclos "originais", bem como o valor de módulo dinâmico e número de ciclos "reparados" até atingir novamente o critério de reparação.	169
Tabela 32 - Avaliação da mistura modificada quanto ao módulo dinâmico e número de ciclos "originais" até atingir o critério de paralização, bem como o valor de módulo dinâmico e número de ciclos "reparados" até atingir novamente o critério de reparação.	170
Tabela 33 - Resultados da reparação da mistura de referência e modificada, expressos através do Índice de Recuperação do módulo dinâmico e da porcentagem de recuperação.....	171
Tabela 34 - Porcentagem de reparação obtida para os corpos de prova da mistura de referência e modificada, além da porcentagem média final de reparação para cada mistura.....	174
Tabela 35 – Degradação do módulo dinâmico recuperado a cada 100 ciclos de carregamento, considerando a mistura de referência e modificada, respectivamente.	177
Tabela 36 - Comparativo, em termos de reparação normalizada ($1/(J/m^3)$), entre estudos acerca de mecanismos de potencialização da propriedade reparadora de misturas asfálticas.	179
Tabela 37 - Número máximo de passadas do eixo rodoviário padrão para ambas as misturas (originais e reparadas), considerando suas respectivas equações de fadiga e níveis de deformação específica obtidos (espessura do revestimento de 15 cm, Araranguá/SC).	182
Tabela 38 - Número máximo de passadas do eixo rodoviário padrão para ambas as misturas (originais e reparadas), considerando suas respectivas equações de fadiga e níveis de deformação específica obtidos (espessura do revestimento de 6 cm, Urubici/SC).....	185

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ASTM *American Society for Testing and Materials*

CAP Cimento Asfáltico de Petróleo

CP Corpo de prova

CSW *Coarse Steel Wool*

DCSE *Dissipated creep strain energy*

DMA *Dynamic mechanical analysis*

DNER Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DSR *Dynamic shear rheometer*

DTT *Direct tension test*

E1 Módulo de armazenamento

E2 Módulo de perda

EHA *Engineered Healing of Asphalt Concrete*

FH *Fatigue relating healing test*

FHI *Fatigue relating healing test with intermittent loading*

FHS *Fatigue relating healing test with storage periods*

FHWA *Federal Highway Administration*

FRHA *Fracture relating healing test*

FWD *Falling Weight Deflectometer*

HB *Hard Bitumen*

I_{Md} Índice de recuperação do módulo dinâmico

LAMP Laboratório de Pavimentação Professor Armando Martins Pereira

LAS *Linear Amplitude Sweep*

MAF Mistura Asfáltica Fina

MMHC *Molar Ratio of Hydrogen atom and carbon atom in methyl and methylene*

M_{Modif} Mistura modificada

M_{Ref} Mistura de referência

MSCR *Multiple Stress Creep Recovery*

MSW *Medium Steel Wool*

MWCNT *Multi-wall Carbon Nanotubes*

NCHRP *National Cooperative Highway Research Program*

NTC Nanotubo de Carbono
OGFC *Open-Graded Friction Course*
PAV *Pressure Aging Vassel*
PB *Pure Bitumen*
PEAD Polietileno de alta densidade
PG *Performance Grade*
PMB *Polymer Modified Bitumen*
PPB Proporção pó-betume
PV *Plato Value*
RBV *Relação betume-vazios*
RDEC *Ratio Dissipated Energy Change*
RILEM *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*
RTFOT *Rolling Thin-Film Oven Test*
SBS Estireno-Butadieno-Estireno
SMA *Stone Matrix Asphalt*
S-VECD *Simplified Visco-elastic Continuum Damage*
SWCNT *Single-wall Carbon Nanotubes*
T_{Modif} Teor de ligante asfáltico modificado
TPH *Intrinsic Two-piece Healing*
T_{Ref} Teor de ligante asfáltico de referência
UFPR Universidade Federal do Paraná
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina
USACE *United States Army Corps of Engineers*
VAM Vazios do agregado mineral
VECD *Visco-elastic Continuum Damage*
Vv Volume de vazios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA.....	28
1.2	OBJETIVOS.....	30
1.2.1	Objetivo Geral	30
1.2.2	Objetivos Específicos	30
1.3	ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA	31
2	REFERENCIAL TEÓRICO	32
2.1	INTRODUÇÃO AO CONCEITO DE AUTORREPARAÇÃO	32
2.2	AUTORREPARAÇÃO	32
2.3	AUTORREPARAÇÃO EM MATERIAIS ASFÁLTICOS.....	36
2.3.1	Caracterização da propriedade autorreparadora de materiais asfálticos	39
2.3.2	Fatores que influenciam a autorreparação de materiais asfálticos	41
2.3.2.1	Propriedades físicas.....	41
2.3.2.2	Energia livre superficial.....	41
2.3.2.3	Composição química.....	42
2.3.2.4	Modificadores	43
2.3.2.5	Períodos de repouso.....	44
2.3.2.6	Temperatura e aquecimento.....	46
2.3.2.7	Carregamento e nível de dano	48
2.3.2.8	Envelhecimento	49
2.4	TÉCNICAS DE AUTORREPARAÇÃO APLICADAS À MISTURA ASFÁLTICA.....	50
2.4.1	Nanopartículas	50
2.4.2	Indução térmica e elétrica	55
2.4.2.1	Indução térmica por meio de micro-ondas	59

2.4.2.2	Indução eletromagnética	62
2.4.2.3	Considerações acerca do uso de fibras metálicas.....	65
2.4.3	Rejuvenescimento.....	67
2.4.4	Resumo dos mecanismos ativadores da autorreparação	69
2.4.5	Aplicação das técnicas de autorreparação em campo	71
2.5	ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA AUTORREPARAÇÃO	71
2.5.1	Ensaio para avaliação da mistura asfáltica	71
2.6	ÍNDICE DE AUTORREPARAÇÃO.....	74
2.7	RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS	76
2.8	SÍNTESE DO REFERENCIAL TEÓRICO	78
3	MÉTODO	79
3.1	ETAPA 1 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	80
3.1.1	Ligante asfáltico de referência	80
3.1.2	Agregados	80
3.1.3	Nanotubo de carbono - NTC.....	83
3.1.4	Lã de aço.....	84
3.2	ETAPA 2 – OTIMIZAÇÃO DOS TEORES DE MATERIAL INCORPORADO (LÃ DE AÇO E NTC).....	85
3.2.1	Parâmetros elétricos	91
3.2.2	Parâmetros térmicos	91
3.3	ETAPA 3 – DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	92
3.4	ETAPA 4 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	97
3.4.1	Desempenho à deformação permanente da mistura asfáltica	98
3.4.2	Comportamento reológico e desempenho à fadiga da mistura asfáltica.....	100
3.5	ETAPA 5 – AVALIAÇÃO DA REPARAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	103

3.5.1	Obtenção do tempo de aquecimento no micro-ondas.....	105
3.5.2	Obtenção do índice de reparação.....	108
3.6	ETAPA 6 – APLICAÇÃO EM ESTRUTURAS DE PAVIMENTO HIPOTÉTICAS.....	109
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	113
4.1	ETAPA 1 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	113
4.1.1	Agregados	113
4.1.2	Lã de aço e NTC.....	115
4.1.2.1	Análise morfológica	115
4.1.2.2	Análise termogravimétrica.....	117
4.1.2.3	Análise do comprimento médio das fibras de lã de aço.....	118
4.2	ETAPA 2 - OTIMIZAÇÃO DOS TEORES DE MATERIAL INCORPORADO (LÃ DE AÇO E NTC)	119
4.2.1	Teor ótimo de fibras de lã de aço	119
4.2.1.1	Parâmetros elétricos	120
4.2.1.2	Parâmetros térmicos	122
4.2.2	Teor ótimo de nanotubo de carbono.....	124
4.2.2.1	Parâmetros elétricos	125
4.2.2.2	Parâmetros térmicos	126
4.3	ETAPA 3 - DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	128
4.3.1	Mistura asfáltica de referência e mistura modificada	130
4.4	ETAPA 4 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	134
4.4.1	Avaliação da deformação permanente.....	134
4.4.2	Avaliação do comportamento reológico das misturas asfálticas.....	140
4.5	ETAPA 5 – AVALIAÇÃO DA REPARAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	157
4.5.1	Aspecto superficial dos corpos de prova contendo lã de aço	157

4.5.2	Obtenção da taxa de aquecimento das misturas	160
4.5.3	Fadiga das misturas asfálticas e capacidade de reparação.....	163
4.6	ETAPA 6 - APLICAÇÃO EM ESTRUTURAS DE PAVIMENTO HIPOTÉTICAS.....	180
5	CONCLUSÕES.....	189
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	190
	REFERÊNCIAS	191
	APÊNDICE 01 – GRÁFICOS DE DOSAGEM DA MISTURA REFERÊNCIA	206
	APÊNDICE 02 – GRÁFICOS DE DOSAGEM DA MISTURA MODIFICADA	208

1 INTRODUÇÃO

O processo de expansão e urbanização das cidades brasileiras está fundamentalmente apoiado no desenvolvimento do modal rodoviário. Este, por sua vez, também contribui significativamente no escoamento da produção nacional, além de oportunizar a integração sociocultural e econômica. Neste contexto, as condições de trafegabilidade possuem expressiva relevância, impactando desde o custo do transporte, até o tempo de deslocamento de bens e serviços (DINIZ, 1987; CASTRO *et al.*, 1999; MENEZES *et al.*, 2014).

Compreender os mecanismos que levam à deterioração da estrutura do pavimento permite programar intervenções preventivas, corretivas e de reabilitação, com o intuito de garantir a adequada manutenção de suas camadas e, assim, promover o aumento da vida útil e tempo de serviço da rodovia (HAN *et al.*, 2018). Entre os defeitos que mais acometem as rodovias brasileiras, o trincamento por fadiga configura como um dos principais mecanismos de ruptura dos revestimentos. Para Zeiada *et al.* (2016), este fator reduz consideravelmente o desempenho do pavimento, impactando na serventia para a qual foi projetado.

O fenômeno de fadiga é resultado de pequenas fissuras, oriundas do estado de tensões e deformações causado por carregamentos cíclicos produzido pelo tráfego (KHALID, 2000; MANGIAFICO, 2014). Esta condição, por sua vez, afeta a rigidez do material, eventualmente levando-o à falha (DI BENEDETTO *et al.*, 2004). O trincamento por fadiga apresenta dois estágios: crescimento e cicatrização de microfissuras e o crescimento e cicatrização de macrofissuras (LITTLE *et al.*, 2001).

A cicatrização está associada à capacidade natural dos materiais asfálticos recuperarem-se do dano ao qual estão submetidos, em função das suas características reológicas. No entanto, essa recuperação consiste em um processo lento, microscópico e dependente de diversos fatores; intrínsecos ao material ou não. Para Qiu (2012), potencializar a propriedade autorreparadora dos materiais asfálticos ao longo do projeto e a produção de pavimentos de concreto asfáltico significa incrementar a durabilidade destes materiais, quando em serviço.

Ao longo das últimas décadas, pesquisadores têm buscado estudar mecanismos que permitam acelerar o processo cicatricial e de reparação das misturas asfálticas, seja pelo emprego de materiais nanoparticulados, incorporação de agentes rejuvenescedores ou pela indução de calor por meio da associação de dispositivos termo indutores e partículas termo e eletricamente condutivas. Pesquisas conduzidas pela Universidade Tecnológica de Delft (*TU Delft*), na Holanda, têm demonstrado a eficácia do mecanismo autorreparador de materiais betuminosos, conforme resultados obtidos por Van den Bergh (2011), Liu (2012), Qiu (2012); além das pesquisas de García (2009) e Lu (2013), pela Universidade de Nottingham e Universidade do Estado de Washington (*WSU*), respectivamente.

Em consequência da inexistência de uma metodologia padronizada para avaliação da capacidade autorreparadora de misturas asfálticas e suas propriedades, as pesquisas acerca dessa temática têm seguido – via de regra – duas abordagens, são elas: mecânica da fratura e mecânica do contínuo. Assim, a União Internacional de Laboratórios e Consultores em Materiais, Sistemas e Estruturas da Construção – RILEM criou um Comitê Técnico intitulado *Engineered Healing of Asphalt Concrete – EHA*, com o intuito de definir uma metodologia de ensaio para concretos asfálticos autorreparadores e estabelecer critérios efetivos de avaliação dos diversos métodos de autorreparação (RILEM, 2017).

Observa-se que o estudo de métodos de regeneração ao dano aplicados à pavimentação mostra-se promissor, tanto no aspecto econômico quanto sob a ótica de engenharia. Em uma perspectiva econômica, possibilitar a modificação da mistura asfáltica a partir da incorporação de materiais alternativos, potencializando propriedades reparadoras, permitirá reduzir a periodicidade nas intervenções de manutenção, restauração e reabilitação de pavimentos. No que concerne à prática de engenharia, o aprimoramento das técnicas tradicionalmente utilizadas permite desenvolver alternativas inovadoras, contribuindo com a indústria do conhecimento e objetivando reduzir os defeitos comumente observados no pavimento.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA

Ainda que a capacidade autógena de recuperação de materiais asfálticos tenha sido verificada por meio de ensaios laboratoriais ao longo dos últimos anos

(BHASIN *et al.*, 2009; QIU, 2012), esta análise requer o consumo de elevados períodos de tempo em laboratório, uma vez que a capacidade intrínseca de recuperação dos materiais asfálticos é dependente da duração dos intervalos de repouso e das condições às quais as amostras são submetidas (ZHU *et al.*, 2017). Assim, a questão central acerca deste fenômeno está na obtenção de uma técnica eficiente, que possibilite acelerar o efeito das variáveis de tempo, temperatura e, conseqüentemente, da autorreparação, na qual o dano por fadiga possa ser minimizado ou parcialmente recuperado, periodicamente (QIU *et al.*, 2012; PAMULAPATI *et al.*, 2017).

Uma alternativa capaz de acelerá-la consiste na adição de fibras metálicas à mistura e sua associação a uma fonte de energia externa. Estas fibras, quando em um teor adequado, contribuirão para a formação de um caminho potencialmente condutivo no interior da camada asfáltica, pelo qual os elétrons estimulados – seja por meio de uma corrente eletromagnética, seja por mecanismos de termo indução – percorrerão (GARCÍA *et al.*, 2009b, 2014; GALLEGO *et al.*, 2013; LIU e SHAOPENG, 2014; TABAKOVIC e SCHLANGEN, 2015).

A partir deste processo de aquecimento, ocorrerá a redução pontual da viscosidade do ligante asfáltico que constitui a mistura. Garcia (2011) aponta que, quando duas partes de uma amostra fissurada são postas face a face, são observados pontos de contato e espaços vazios. Estando a temperatura suficientemente alta, permitindo o ligante asfáltico comportar-se como um fluido, surgirá uma diferença de pressão nos pontos de contato, onde o ligante asfáltico fluirá (por capilaridade) e, conseqüentemente, selará a fissura.

Como a eficiência deste caminho condutivo depende da adequada dispersão das fibras metálicas, a fim de minimizar a descontinuidade no contato entre fibras, pode-se fazer uso de materiais nano particulados. De acordo com Qiu (2012) a característica nanoestrutural facilita sua deposição no local do dano criando uma espécie de ligação.

Os nanotubos de carbono (NTC) vêm ao encontro deste contexto, uma vez que, de acordo com Matos (2011), este material apresenta grande potencial de uso em compósitos. Além disso, quando isoladamente avaliado destaca-se por sua

estabilidade térmica, capacidade de condução térmica e potencial aplicação em sistemas elétricos (MATOS, 2011; PÉREZ *et al.*, 2016 QIU E YANG, 2017). Além da contribuição nas propriedades mecânicas e reológicas de ligantes asfálticos (módulo dinâmico, resposta elástica em baixas frequências e elevadas temperaturas, resistência à deformação permanente), atestadas em pesquisas como as de Motlagh *et al.*, 2012; Steyn *et al.*, 2013; Melo, 2014; Amin *et al.*, 2016; Pérez *et al.*, 2016; Ashish e Singh, 2018.

Portanto, esta pesquisa propõe associar o benefício de ambos os materiais (NTC e fibra de lã de aço), de forma que, quando submetidos a equipamentos capazes de induzir correntes elétricas e/ou ondas eletromagnéticas, culminem na aceleração do processo regenerador.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a contribuição da adição de fibras de lã de aço associadas ao nanotubo de carbono na capacidade de reparação ao dano de uma mistura asfáltica densa.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Otimizar, por meio da avaliação de parâmetros elétricos e térmicos da mistura asfáltica fina (MAF), a porcentagem de fibras de lã de aço e nanotubos de carbono a ser incorporada à mistura asfáltica correspondente;
- b) Verificar a influência da adição das fibras de lã de aço e da incorporação dos nanotubos de carbono no procedimento de dosagem e respectivos requisitos volumétricos de uma mistura asfáltica densa, bem como no seu desempenho mecânico e comportamento reológico;
- c) Potencializar a reparação de uma mistura asfáltica densa, contendo os teores otimizados de incorporação, sob o método de indução de temperatura por micro-ondas.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

A estrutura desta dissertação abrange cinco capítulos, organizados de maneira a conduzir ao entendimento do que se propôs avaliar nos objetivos gerais e específicos, conforme apresentado a seguir:

Capítulo 1 – Introdução: descreve, de maneira concisa, a relevância e a problemática na qual está inserida a proposta de estudo, bem como a delimitação dos objetivos iniciais.

Capítulo 2 – Referencial Teórico: compreende o estado da arte acerca da temática estudada, abordando os principais conceitos e parâmetros extraídos da literatura nacional e internacional. A contextualização do tema estudado é inicialmente apresentada a partir da teoria de autorreparação de materiais poliméricos. A partir deste conceito, apresentam-se: o processo de autorreparação de materiais asfálticos, fatores e propriedades internas e externas ao material que influenciam a sua capacidade reparadora, os dispositivos empregados para facilitar o processo de reparo e uma revisão das metodologias e ensaios empregados para quantificar a capacidade reparadora dos materiais asfálticos.

Capítulo 3 – Método: apresenta as etapas necessárias para execução do plano experimental, bem como os ensaios e normativas vigentes.

Capítulo 4 – Apresentação e discussão dos resultados: apresenta os resultados obtidos através da execução do plano experimental, discutindo-os e comparando-os com os requisitos normativos e estudos previamente realizados.

Capítulo 5 – Conclusões: esta etapa indica os principais aspectos observados ao longo da pesquisa, respondendo ao objetivo geral e aos objetivos específicos inicialmente traçados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 INTRODUÇÃO AO CONCEITO DE AUTORREPARAÇÃO

Através da análise do desempenho de pavimentos asfálticos, em termos de trincamento por fadiga, diferenças entre resultados de avaliações laboratoriais e de campo têm sido observadas. Entre várias hipóteses estabelecidas na literatura para tal divergência, uma delas estabelece que, em oposição ao carregamento contínuo estabelecido em laboratório durante ensaios de fadiga, o pavimento (em campo) está sujeito a solicitações produzidas pelo tráfego com diferentes intervalos de repouso; controlados pela respectiva velocidade, frequência e carga dos veículos (CARPENTER *et al.*, 2006; LU, 2013).

Ao longo destes intervalos de repouso, verifica-se a ocorrência do fenômeno de autorreparação. A autorreparação configura uma propriedade relevante no estudo dos materiais asfálticos, uma vez que possui capacidade de expandir a vida útil do pavimento, além de influenciar aspectos econômicos e de segurança (BHASIN *et al.*, 2009; GARCÍA *et al.*, 2011; QIU, 2012; LU, 2013).

Nesse contexto, o conceito de capacidade autorreparadora tem sido gradativamente incorporado ao estudo de pavimentos asfálticos (LYTTON, 2000). Como exemplo, tem-se a adoção de “fatores de deslocamento” ou *shift-factors*, que buscam incorporar a capacidade de regeneração dos materiais asfálticos em equações de fadiga e suas respectivas metodologias de ensaio. Qiu (2012) sintetiza alguns “fatores de deslocamento” empregados na literatura de diversos países, os quais variam desde 4 (Holanda), 7,1 (Bélgica) até 20 (Reino Unido).

2.2 AUTORREPARAÇÃO

A capacidade de recuperação ao dano é característica presente em diversos materiais, sejam eles naturais ou artificiais. Biologicamente, os mecanismos de “autocura” de organismos, através da ação de danos e reparo contínuos, são bastante explorados. A partir deste conhecimento, tem-se buscado aumentar a capacidade autorreparadora em elementos sintéticos, com a finalidade de nortear os princípios de recuperação e estender a vida útil dos materiais correntemente utilizados (QIU, 2012).

Para ambos os cenários, natural e artificial, a resposta inicial é estimulada a partir do dano. No caso de elementos naturais, esta reação é tripla: resposta inflamatória (imediate), proliferação celular (secundária) e, por fim, remodelação da matriz (verificada em longo prazo). Os materiais sintéticos, por sua vez, também compartilham destas três etapas. Entretanto, de maneira mais simplista e mais acelerada. A primeira etapa consiste em desencadear – ou promover – a atuação do mecanismo reparador; o segundo estágio, compreende o transporte dos materiais até o local do dano. Por fim, na terceira etapa, ocorre o processo de reparo químico, equivalente ao processo biológico de remodelação da matriz. Todas as três etapas são fortemente influenciadas pelo tempo. Porém, a terceira fase está intimamente ligada ao tipo de material ou técnica de cicatrização empregada (BLAISZIK *et al.*, 2010).

De acordo com a *Federal Highway Administration – FHWA* (2001), no primeiro volume do relatório do Projeto “*Microdamage Healing in Asphalt and Asphalt Concrete: Microdamage and Microdamage Healing*”, para melhor compreender o mecanismo autorreparador de concretos asfálticos, é útil recorrer aos modelos de recuperação desenvolvidos para os polímeros. Macromecanicamente, a técnica usualmente empregada para descrever as propriedades de autorreparação dos materiais poliméricos baseia-se em medir as propriedades de mecânica da fratura de um polímero já reparado. Estas propriedades são dependentes da duração do período de cicatrização, temperatura, peso molecular e da pressão aplicada durante a autorreparação (LITTLE *et al.*, 2001).

Quando duas partes de um mesmo material polimérico amorfo são colocadas em contato a uma temperatura superior à de transição vítrea, a superfície de contato produz uma força mecânica capaz de promover sua cicatrização gradualmente, até que, em tempo de contato suficientemente longo, se tornem indistinguíveis de um polímero em massa. Considera-se, então, que a amostra está cicatrizada (PRAGER e TIRRELL, 1988). Assim sendo, materiais com capacidade autorreparadora (*self healing*) manifestam a habilidade de autorrecuperar-se do dano mecânico ou termicamente induzido (GARCÍA, 2011; QIU, 2012). Além disto, este reparo pode

ocorrer de forma autônoma ou ser ativado por meio de estímulos externos, uma ou mais vezes durante a sua vida útil (GARCÍA, 2011).

Wool e O'Connor (1981) estudaram o mecanismo autorreparador de materiais poliméricos através do desenvolvimento de uma teoria microscópica relacionada a suas características mecânicas. Nesta teoria, primeiramente, considera-se um polímero em seu estado virgem, submetido a condições de referência, com propriedades mecânicas também conhecidas: tensão de fratura (σ_{∞}), alongamento de quebra (ε_{∞}), módulo de tração (Y_{∞}), energia de impacto ou energia de fratura (E_{∞}), medidas espectrópicas gerais (I_{∞}) de parâmetros moleculares ou microestruturais via infravermelho, dispersão de luz, entre outros aspectos.

Sequencialmente, submete-se o material a determinado dano, possivelmente envolvendo fissuras, fraturas, manchas ou vazios através de um histórico de deformação de referência. Em seguida, este mesmo material é submetido a um histórico de “cicatrização”, compreendendo: tempo de recuperação (t_h), temperatura de recuperação (T_h) e pressão de recuperação (P_h). As propriedades parcialmente recuperadas do material ensaiado são examinadas e comparadas às verificadas no estado virgem, por meio de índices de recuperação (R) adimensionais; onde $0 \leq R \leq 1$, conforme Equação 1 a 4. (WOOL e O'CONNOR, 1981).

$$R(\sigma) = \sigma/\sigma_{\infty} \quad (1)$$

$$R(\varepsilon) = \varepsilon/\varepsilon_{\infty} \quad (2)$$

$$R(E) = E/E_{\infty} \quad (3)$$

$$R(I) = I/I_{\infty} \quad (4)$$

Onde:

σ : tensão de fratura;

ε : alongamento de quebra;

Y : módulo de tração;

E : energia de impacto ou energia de fratura;

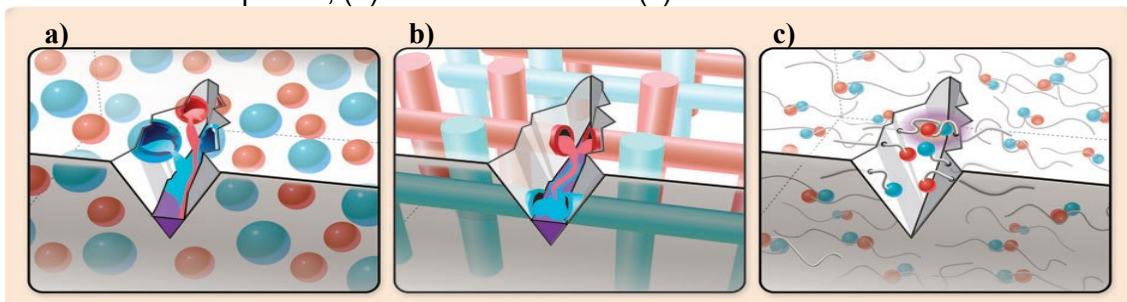
I : medidas espectrópicas gerais; e

∞ : medida relativa ao material no estado virgem.

Para Blaiszik *et al.* (2010), os mecanismos autorreparadores podem ser classificados em três grupos distintos: sistemas à base de cápsulas, sistemas vasculares e sistemas intrínsecos. Cada grupo difere-se em relação à abordagem empregada para desencadear o processo de autorreparação. Esta abordagem, por sua vez, determina o volume de dano que poderá ser recuperado, bem como a taxa e a repetibilidade do processo para cada sistema.

Sistemas encapsulados armazenam o agente reparador no interior de cápsulas discretas que, quando rompidas através do dano, promovem a liberação e consequente reação do agente reparador na região danificada (Figura 1a). O sistema vascular armazena o agente reparador em uma rede de capilares ou canais ocultos, podendo apresentar arranjo unidimensional (1D), bidimensional (2D) ou tridimensional (3D) (Figura 1b), também ativado a partir do dano. Por fim, o sistema intrínseco (Figura 1c) não possui um agente de cicatrização interno e sua propriedade de autorreparação oculta ocorre através do dano ou de estímulos externos. Em função da reversibilidade das reações desencadeadas no sistema intrínseco, diversos ciclos de autorreparação tornam-se possíveis (BLAISZIK *et al.*, 2010).

Figura 1- Representação esquemática do modo de ativação de: (a) sistemas à base de cápsulas, (b) sistema vascular e (c) sistema intrínseco.



Fonte: Blaiszik *et al.* (2010).

Wool e O'Connor (1981) identificaram cinco estágios para o processo de autorreparação que influenciam em medidas mecânicas e espectrométricas, sendo: (1) rearranjo superficial, (2) aproximação superficial, (3) molhabilidade, (4) difusão e (5) aleatorização das partículas. A partir disto, concluíram que os estágios de molhabilidade e de difusão são os responsáveis pela maior parcela da autorreparação

das propriedades mecânicas dos materiais, além de controlar a função intrínseca de reparo, apresentada na Equação 5.

$$R = \int_{-\infty}^t R_h(t - \tau) \frac{d\phi(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (5)$$

Onde:

$R_h(t)$: reparo intrínseco em função do tempo t ;

$\phi(t)$: distribuição da molhabilidade em função do tempo t ;

τ : variável tempo.

Sabendo que as propriedades dos materiais sofrem degradação ao longo do tempo, devido ao dano ao qual estes estão submetidos, o conceito de autorreparação pode ser sintetizado pelo seguinte raciocínio: um material autorreparador conseguirá, integral ou parcialmente, reparar os danos que sofrerá durante sua vida útil (QIU, 2012; GARCÍA *et al.*, 2012). A capacidade autorreparadora, por sua vez, poderá ser uma propriedade intrínseca do material ou poderá ocorrer devido aos estímulos externos (LU, 2013).

2.3 AUTORREPARAÇÃO EM MATERIAIS ASFÁLTICOS

As pesquisas acerca da capacidade autorreparadora de materiais asfálticos podem ser agrupadas em duas categorias. A primeira categoria corresponde àquelas com o intuito de quantificar o efeito da recuperação no desempenho das misturas asfálticas. A segunda categoria visa compreender o mecanismo reparador e as propriedades do material que contribuem para uma recuperação a nível macroscópico (BOMMAVARAM, 2008).

A determinação da capacidade autorreparadora de materiais betuminosos está, em maior parte, relacionada a ensaios mecânicos, sendo analisada a partir da introdução de uma série de períodos de repouso entre carregamentos sucessivos. O efeito autorreparador é avaliado comparando a resposta do material ensaiado com e sem períodos de repouso (QIU, 2012). Os resultados destes ensaios são extremamente úteis para estabelecer indicativos da capacidade de reparo, bem como

a classificação relativa à propensão dos diferentes tipos de ligante de se autorreparar (BHASIN *et al.*, 2009).

Desde 1960, pesquisas laboratoriais têm demonstrado que durante ensaios de fadiga em misturas asfálticas a vida de fadiga aumenta quando induzidos períodos de repouso entre carregamentos consecutivos. Acredita-se que esta condição, chamada *healing* ou “cicatrização”, também esteja presente ao longo da vida útil do pavimento em campo (VAN DEN BERGH, 2011).

Baseado nos estudos de Wool e O’Connor (1981) referente aos estágios de recuperação ao dano de materiais poliméricos (subitem 2.2), diversos autores têm buscado analisar o mecanismo reparador de materiais betuminosos e as diferentes etapas que o constituem. Para Little e Bhasin (2007), a recuperação ao dano de misturas asfálticas pode ser caracterizada a partir de um modelo três etapas: (1) contato entre as duas faces de uma nanofissura, (2) difusão entre moléculas de uma face à outra, fator que é responsável pelo imediato acréscimo na resistência e (3) aleatorização das moléculas difundidas, a fim de garantir o ganho de resistência em longo prazo.

Durante o fenômeno de fadiga observa-se a ocorrência de fissuras no material. Nestas fissuras é possível distinguir uma zona de fratura, que consiste em nanofendas que se estendem, causadas por uma força externa. Até certo limite, essa zona de fratura pode transferir forças. Com a remoção da carga externa ocorrem dois processos característicos do material: a recuperação viscoelástica e a recuperação da zona fraturada. A diferença entre ambos é que, enquanto o primeiro processo diz respeito ao rearranjo molecular no interior do material (denominado na literatura internacional como *wetting stage*), o segundo fenômeno é uma consequência do contato e da difusão entre as faces da fratura para alcançar as propriedades do material virgem (intitulado *intrinsic healing* ou reparo intrínseco) (VAN DEN BERGH, 2011; AGZENAY *et al.*, 2015; LEEGWATER *et al.*, 2016).

Devido à complexidade e à heterogeneidade na estrutura molecular dos ligantes asfálticos, a aplicação da função de reparo intrínseca proposta por Wool e O’Connor (Eq. 5, subitem 2.1) pode não ser viável. Em contrapartida, um modelo mais

genérico, com parâmetros que podem ser obtidos em ensaios mecânicos mais simplistas é proposto (BHASIN *et al.*, 2009; LU, 2013).

A equação proposta por Bhasin *et al.* (2009) para representar o reparo intrínseco de materiais betuminosos consiste em uma versão modificada da equação de Avrami (comumente utilizada para descrever processos como: taxas de reações químicas e cinética de transformação de fases em sólidos). A modificação da Equação de Avrami contempla a inclusão de uma constante R_0 , necessária para representar o ganho imediato de força na área contato da fissura através da coesão interfacial, conforme a Equação 6.

$$R_h(t) = R_0 + p(1 - e^{-qt^r}) \quad (6)$$

Onde:

R_0 : ganho de força instantâneo devido à coesão interfacial na fissura;

p : equivale a $(100 - R_0)$;

t : tempo de “cicatrização”;

q e r : correspondem ao efeito de reparo devido à interdifusão das moléculas através da interface de contato.

Uma vez que R_0 expressa o efeito de recuperação instantânea devido à coesão na interface da fratura, acredita-se que a sua magnitude terá relação com o trabalho de coesão do material ou sua energia de superfície (BHASIN *et al.*, 2009).

Entretanto, para Kringos *et al.* (2011) e Butt *et al.* (2012) esta metodologia não contribui, de maneira expressiva, para o conhecimento acerca das propriedades autorreparadoras de materiais betuminosos, uma vez que se limita em realizar ensaios de fadiga, com e sem períodos de repouso, dos quais medidas gerais da rigidez das amostras são calculadas. As amostras submetidas ao ensaio de fadiga com períodos de repouso tendem a apresentar menor queda de rigidez se comparada às aquelas submetidas ao carregamento harmônico. Esta taxa é diretamente empregada para quantificar o reparo (*healing*) do ligante durante períodos de repouso. Entretanto, parte desta taxa pode ser contribuição do comportamento viscoelástico do descarregamento e representa pouco sobre o reparo químico-mecânico do material, o que não contribui completamente para o entendimento dos parâmetros de controle.

2.3.1 Caracterização da propriedade autorreparadora de materiais asfálticos

Os estudos sobre a caracterização dos materiais asfálticos em termos de propriedades autorreparadoras concentram-se em diversos níveis, dependendo da temática a ser avaliada. Seu conteúdo pode abranger: ligantes asfálticos, mástiques asfálticos (sistema ligante + filer), misturas asfálticas e o próprio pavimento asfáltico (QIU, 2012). Pesquisas como as de Kim e Little (1988), Little *et al.* (1998; 2001), García (2009), Lytton (2000), Williams *et al.* (2001), Kim e Roque (2006), Van den Bergh (2011), Qiu (2012) e Lu (2013) têm evidenciado a existência da capacidade reparadora destes materiais e o seu impacto na vida de fadiga de materiais asfálticos.

Qiu (2012) apresenta duas categorias de ensaio para avaliação da capacidade autorreparadora de materiais asfálticos: testes de reparo relacionados à fadiga (*Fatigue Relating Healing Test – FH*) e testes de reparo relacionados à fratura (*Fracture Relating Healing Test – FRAH*). Os testes relacionados à fadiga podem ainda ser subdivididos em dois grupos: (1) com aplicação de carga intermitente e (2) com períodos de armazenamento. Nos testes com carga intermitente, cada ciclo de carregamento é seguido por um período de repouso; enquanto testes com períodos de armazenamento são realizados submetendo a amostra a contínuas repetições de carga (assim como no ensaio convencional de fadiga) durante determinados períodos. As repetições de cargas são interrompidas por ciclos de armazenamento e repouso das amostras, que são mantidas sob condições previamente estabelecidas e sem aplicação de carga.

Tanto analiticamente quanto quantitativamente, não se dispõe de uma metodologia universal para avaliar a capacidade de cicatrização dos materiais asfálticos e a grande parte dos estudos disponíveis atualmente trata apenas de caracterizar o potencial de reparação. Além disto, tem-se observado diferenças nos resultados de diversos trabalhos em função da temática escolhida para avaliação. Enquanto algumas pesquisas examinam a recuperação apenas pela avaliação do ligante, outras exploram a capacidade reparadora das misturas asfálticas e do mástique asfáltico (ROQUE *et al.*, 2012).

A propagação do dano e a capacidade de recuperação dos materiais asfálticos pode se estabelecer de duas maneiras: adesiva ou coesiva. A condição adesiva implica na interação entre dois materiais, no caso de misturas asfálticas representada pela interface ligante-agregado, enquanto que a condição coesiva envolve apenas o mástique asfáltico (ligante e agregado miúdo). Uma vez que as fissuras se propagam pelo meio de menor resistência, presume-se que o caminho de menor energia (adesivo ou coesivo) estabelecerá o respectivo modo de fratura e, conseqüentemente, a capacidade de recuperação (WILLIAMS *et al.*, 2001; GARCÍA, 2011).

De acordo com Van den Bergh (2011), as propriedades de fadiga e autorreparação de misturas asfálticas não são afetadas exclusivamente por características relativas ao ligante asfáltico, mas também pelas características dos agregados de menor dimensão e do filer. Portanto, é recomendado realizar ensaios de fadiga e de recuperação também em mástiques asfálticos, nos quais considera-se o aspecto coesivo da mistura, admitindo-se que o mástique cubra os agregados de maior dimensão. A Tabela 1 sintetiza os métodos de caracterização da capacidade reparadora de materiais betuminosos, tanto a nível laboratorial quanto a nível de ensaios de campo.

Tabela 1 - Métodos de caracterização da capacidade reparadora de materiais asfálticos.

Abordagem	Ensaio	Ligantes e mástiques	Misturas asfálticas
Ensaio de reparo relacionados à fadiga	Ensaio de reparo relacionados à fadiga com aplicação de carga intermitente	Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR); Análise Dinâmico-mecânica (DMA).	Flexão em viga dois, três e quatro pontos; Uniaxial Push-pull.
	Ensaio de reparo relacionados à fadiga com períodos de armazenamento	DSR	Flexão em viga dois e três pontos; Ensaio de tração indireta.
Ensaio de reparo relacionados à fratura		DSR, DMA	Ensaio de tensão uniaxial; Ensaio de flexão.
Outros Ensaio		Microscopia eletrônica de varredura; Energia superficial.	

Fonte: Adaptado de Qiu, (2012).

Embora não se tenha uma metodologia padronizada de ensaios, tampouco normativas para avaliação da capacidade autorreparadora de materiais asfálticos, abordagens envolvendo ensaios relacionados à fadiga, considerando períodos de

armazenamento, têm sido fortemente empregadas como metodologia de avaliação de ligantes e misturas asfálticas (AYAR *et al.*, 2016).

2.3.2 Fatores que influenciam a autorreparação de materiais asfálticos

2.3.2.1 Propriedades físicas

Valores de penetração e de ponto de amolecimento são usualmente empregados para caracterizar fisicamente os ligantes asfálticos (QIU, 2012). Pesquisas como as de Van *et al.* (1982) e Bonnaure *et al.* (1982) ambas citadas por Qiu (2012) apontam que ligantes macios, com valores de penetração elevados e baixo ponto de amolecimento apresentam maior capacidade reparadora em comparação a ligantes com elevada dureza.

2.3.2.2 Energia livre superficial

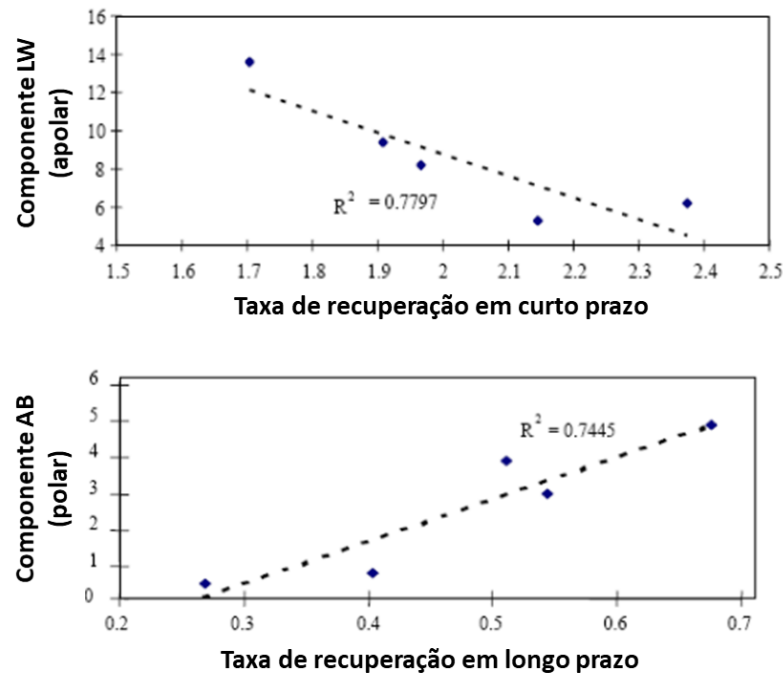
Parâmetros como a mobilidade das partículas, configurações de energia livre potencial de ligantes e energia livre superficial têm significativo efeito na capacidade de autorreparação de materiais asfálticos. Conhecer o potencial de energia livre superficial de ligantes asfálticos pode auxiliar em uma melhor previsão da habilidade do material de transmitir tensões e reduzir a propagação do dano (BUTT *et al.*, 2012).

A energia livre superficial de um sólido ou líquido corresponde à energia necessária para criar uma nova área de superfície de determinado elemento, em condições de vácuo. Esta energia combina um componente apolar, que representa vínculos físicos (teoria de Lifshitz acerca das forças de Van der Waals), e um componente ácido-base, que representa a ligação química, ou seja, a ação de troca de elétrons (LYTTON, 2000; QIU, 2012).

Ligantes com maior presença de componentes de energia livre superficial do tipo ácido-base (AB) possuem maior potencial reparador em longo prazo comparado àqueles que apresentam baixo número de componentes ácido-base. Assim como, ligantes com elevada interação de forças de Van der Waals (LW), inibem a cicatrização em curto prazo, conforme apresentado na Figura 2. Desta forma,

materiais com melhor desempenho reparador possuem maior parcela de componentes ácido-base e menor proporção de forças de Lifshitz-Van der Waals em sua energia livre superficial (LITTLE *et al.*, 1998; LYTTON, 2000).

Figura 2 - Relação entre a taxa de reparo inicial e a energia superficial apolar e polar, respectivamente.



Fonte: Adaptado de LYTTON (2000) e QIU (2012).

2.3.2.3 Composição química

Little *et al.* (2001) avaliaram a influência da composição química de diferentes tipos de ligantes na capacidade autorreparadora destes materiais. Os ligantes selecionados variaram na quantidade de compostos de cera, compostos anfóteros e compostos aromáticos, pois, de acordo com os autores, fortes variações nestes componentes e suas interações podem afetar características de fluxo e envelhecimento dos ligantes e, portanto, apresentariam tendência mais acentuada de influenciar a capacidade autorreparadora. Outro fator relevante apontado diz respeito à alta presença de heteroátomos (substâncias químicas como enxofre, nitrogênio e oxigênio), capazes de ocasionar polaridade. Seus efeitos são indiretamente contabilizados quando se considera parâmetros aromáticos e anfóteros.

Desta forma, ligantes com baixo teor anfótero e alto conteúdo aromático possuem melhor capacidade reparadora. Além disto, a presença de heteroátomos

pode contribuir no processo de reparo devido à sua polaridade no ligante asfáltico (WILLIAMS *et al.*, 2001). Outro fator relevante associado à composição química do ligante é a relação MMHC, que corresponde ao número de átomos de metil e hidrogênio metilênico e átomos de metil e carbono metilênico em moléculas alifáticas independentes ou cadeias alifáticas ligadas a cicloalcanos e centros aromáticos. Quanto maior a relação MMHC no ligante, menor o potencial de recuperação (KIM, 1990 *apud* LU, 2013).

2.3.2.4 Modificadores

A influência do uso de modificadores no ligante asfáltico, em termos de capacidade autorreparadora, é um tópico ainda confuso entre pesquisadores (QIU, 2012). Com base em um estudo prévio realizado pela *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) para elaboração do Projeto 9-10 (2001), oito tipos de ligantes foram analisados: dois ligantes puros, dois ligantes modificados com plastômeros, dois modificados com elastômeros e dois modificados a partir de processos de oxidação. Os resultados obtidos demonstram que ligantes modificados apresentam maior potencial reparador em comparação a ligantes puros. Desta forma, observou-se que modificadores de asfalto podem alterar a capacidade reparadora dos ligantes asfálticos (BAHIA *et al.*, 1998).

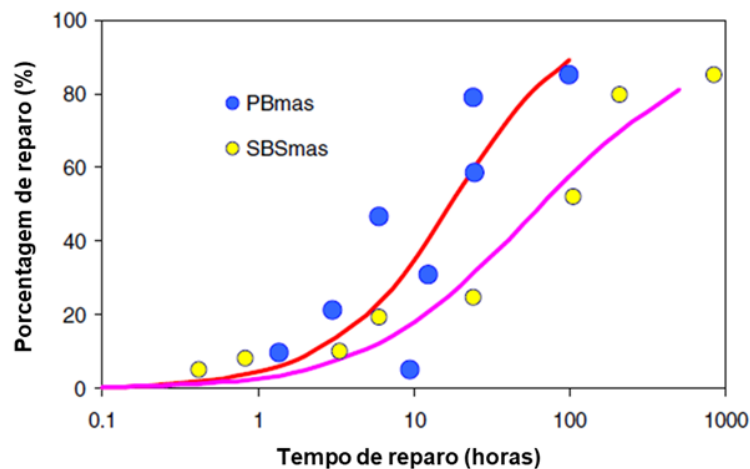
Shen *et al.* (2010) também avaliaram dois diferentes tipos de ligante asfáltico; um ligante puro e um ligante modificado por adição de polímeros, hipoteticamente, com diferentes capacidades reparadoras. Para as mesmas condições de ensaio, o ligante modificado apresentou uma taxa de recuperação superior em comparação ao ligante puro, corroborando com o estudo de Bahia *et al.* (1998).

Entretanto, em estudo semelhante, modificadores como o polímero estireno-butadieno-estireno (SBS) e o polietileno de alta densidade (PEAD) atuaram como fíler quando incorporados ao ligante, impedindo a capacidade natural do ligante puro de se autorrecuperar (LITTLE *et al.*, 1998). Uma possível explicação para o impacto negativo dos aditivos poliméricos na capacidade recuperadora está na composição do ligante. Quanto maior a compatibilidade das partículas de polímero com o ligante

asfáltico, maior a absorção de ligante por estas partículas, o que provoca seu inchamento. A parcela não absorvida de ligante é posta em contato com componentes com maior concentração de asfaltenos (altamente interativo), tornando-se menos propenso a fluir e – conseqüentemente – a recuperar (QIU, 2012). Desta forma, o aditivo polimérico pode apresentar um efeito positivo retardando o crescimento da fratura, porém negativo na capacidade reparadora do material (LITTLE *et al.*, 1998).

A Figura 3 apresenta um comparativo entre as curvas de recuperação para o mástique asfáltico puro (PBmas) e modificado por polímero SBS (SBSmas) ensaiados por Qiu *et al.* (2012) através de um procedimento de fratura/reparo/refratura, a uma temperatura de referência de 20 °C empregando a metodologia DTT – *Direct Tension Test* ou Ensaio de Tensão Direta. Observa-se que a recuperação, em relação a resistência à fratura, para a amostra utilizando ligante puro ocorre em menor tempo que para o ligante modificado por polímero SBS.

Figura 3 - Comparativo entre o tempo de reparo (em termos de resistência à fratura) para o mástique contendo ligante puro e modificado por polímero SBS.



Fonte: Adaptado de Qiu *et al.*, (2012).

2.3.2.5 Períodos de repouso

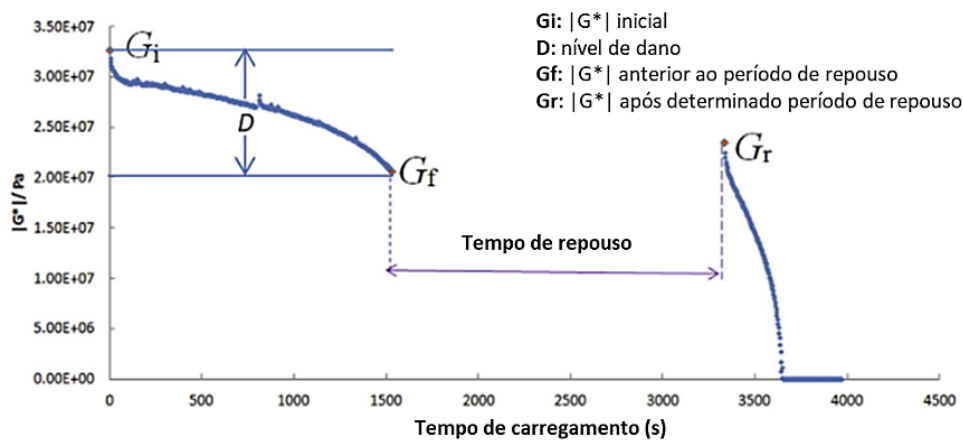
Pequenos intervalos de repouso na avaliação de ensaios de fadiga com aplicação intermitente de carga (*FHI Test Procedure*), bem como longos períodos de repouso na avaliação de fadiga com períodos de armazenamento (*FHS Test Procedure*) e em ensaios de fratura (*FRAH*) provocam acréscimo na capacidade autorreparadora de ligantes asfálticos na medida em que a duração dos intervalos de repouso aumenta (QIU, 2012).

Shen *et al.* (2010) observaram um aumento significativo na capacidade recuperadora de ligantes asfálticos a partir do incremento do tempo de repouso. Com a inclusão de um período de repouso entre carregamentos de 6 segundos, a vida de fadiga de um ligante puro apresentou incremento de aproximadamente 7 vezes e 17 vezes para um ligante modificado por polímero. Cabe ressaltar que, conforme apontado no subitem anterior, a maior taxa de recuperação para ligantes modificados em comparação a ligantes puros depende – entre outros fatores – do tipo de modificador utilizado e sua interação com o ligante de referência.

Lu *et al.* (2003) analisaram a influência do período de repouso em amostras de ligante através de ensaios de fadiga com carregamento intermitente sob tensão controlada. A análise envolveu diferentes períodos de carregamento/repouso. Os resultados obtidos indicaram que a aplicação de tempos de repouso permite incrementar a capacidade reparadora de ligantes asfálticos. Entretanto o efeito significativo do período de repouso entre carregamentos está altamente associado ao tipo de ligante ensaiado.

Abordagem semelhante é realizada por Sun *et al.* (2015), através da análise do desempenho de ligantes asfálticos submetidos a ensaios de fadiga-repouso-fadiga. Os ensaios foram conduzidos em um reômetro de cisalhamento dinâmico, utilizando pratos paralelos com 8 mm de diâmetro e espaçamento de 2 mm, sob tensão controlada. A Figura 4 ilustra o comportamento do material asfáltico durante o ensaio, onde observa-se que, após a aplicação de um período de repouso entre carregamentos, ocorre a recuperação do módulo de cisalhamento dinâmico (representado na figura pela diferença entre G_r e G_f).

Figura 4 – Efeito da incorporação de períodos de repouso no módulo de cisalhamento dinâmico.



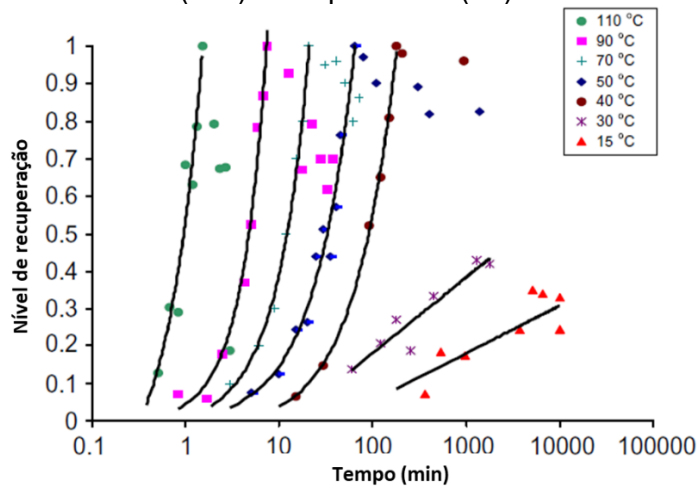
Fonte: Adaptado de Sun *et al.*, (2015).

2.3.2.6 Temperatura e aquecimento

O efeito da temperatura na capacidade autorreparadora de misturas asfálticas é um parâmetro extensivamente avaliado em diversos estudos. De acordo com Kim e Roque (2006), a taxa de recuperação ao dano de misturas asfálticas mostra-se sensível ao aumento da temperatura de maneira altamente não-linear. Esta influência foi observada em seu trabalho através da análise de misturas asfálticas ensaiadas em três temperaturas distintas (0 °C, 10 °C e 20 °C), no qual constatou-se que a aplicação de temperaturas mais elevadas durante o ensaio de fadiga do material apresenta maiores taxas de recuperação.

Para García (2011), os níveis de recuperação aumentam com o passar do tempo, assim como a velocidade de recuperação aumenta com o incremento da temperatura. Desta forma, verifica-se a existência de um “tempo ótimo” de aquecimento para cada temperatura de repouso, no qual a recuperação ao dano da amostra será completa. Caso o tempo de aquecimento da amostra seja superior ao “ótimo”, o nível de recuperação diminui, uma vez que a amostra pode sofrer desagregações e/ou deformações devido à perda de adesão entre os materiais. A Figura 5 apresenta a relação entre as diferentes temperaturas de aquecimento e a respectiva recuperação ao dano no ensaio de flexão em três pontos, bem como o tempo de reparo necessário.

Figura 5 - Níveis de recuperação no ensaio flexão em três pontos para diferentes tempos (min) e temperaturas (°C).



Fonte: Adaptado de GARCÍA (2011).

Induzir o aquecimento de amostras danificadas permite acelerar o processo de recuperação de misturas asfálticas, contribuindo para quantificar a capacidade reparadora. Além disto, através da indução de calor é possível medir a velocidade de aquecimento das amostras e estimar o tempo necessário para obtenção de determinada temperatura nos ensaios subsequentes. Embora a indução de calor aumente a vida de fadiga das amostras de material asfáltico, a taxa de cicatrização é altamente dependente do nível de microdeformações aplicadas (maior taxa de recuperação para maiores níveis de microdeformações) (LIU *et al.*, 2011).

A técnica de indução de calor em misturas asfálticas tem o propósito de promover a cicatrização ou reparo do material e pode ser produzida a partir da adição de fibras eletricamente condutivas à mistura asfáltica, posteriormente aquecidas por meio de um dispositivo indutor térmico (GARCÍA *et al.*, 2013). Os mecanismos termo e eletricamente indutores serão explorados de maneira mais ampla no subitem 2.4.2.

De acordo com Shen *et al.* (2010) o real efeito da temperatura na capacidade reparadora de materiais asfálticos pode ser sintetizado através da seguinte constatação: com a redução da temperatura, o potencial reparador também diminui e – por consequência – a propriedade de estender a vida de fadiga entre ciclos de repouso decresce.

2.3.2.7 Carregamento e nível de dano

Para Qiu (2012), o tipo de carregamento empregado na análise da capacidade reparadora de materiais betuminosos também exerce influência na recuperação final, incluindo diferentes metodologias de ensaio (*Fatigue relating healing test with intermittent loading* – FHI, *Fatigue relating healing test with storage periods* – FHS e *Fracture relating healing test* – FRAH) e diferentes modos de controle: deformação controlada ou tensão controlada.

Kim e Roque (2006) avaliaram a capacidade reparadora de misturas asfálticas e expressaram-na através da recuperação da Energia de Deformação de Fluência Dissipada, ou *Dissipated Creep Strain Energy* – DCSE, por unidade de tempo. Este parâmetro consiste na parcela de energia absorvida responsável por danificar a amostra ensaiada, enquanto a energia de fratura trata da energia total (DCSE + energia elástica) necessária para fraturar uma amostra de concreto asfáltico. Constatou-se que a taxa de recuperação é proporcional a DCSE para todas as misturas testadas no estudo, indicando que a taxa de reparo absoluta é dependente da proporção de dano presente na amostra.

A influência da tensão na taxa de recuperação de materiais betuminosos ocorre inversamente. Sob elevada tensão, maiores deformações são impostas ao material, o que pode resultar em maior distanciamento entre a interface de uma microfissura e – conseqüentemente – em menor capacidade de recuperação. Sob uma abordagem micromecânica, em maiores tensões, as moléculas de ligante são afastadas umas das outras, resultando em maior espaçamento entre as fissuras e em menor força molecular para reaproximá-las na sua posição de equilíbrio e, portanto, o potencial de recuperação das microfissuras é reduzido (SHEN *et al.*, 2010).

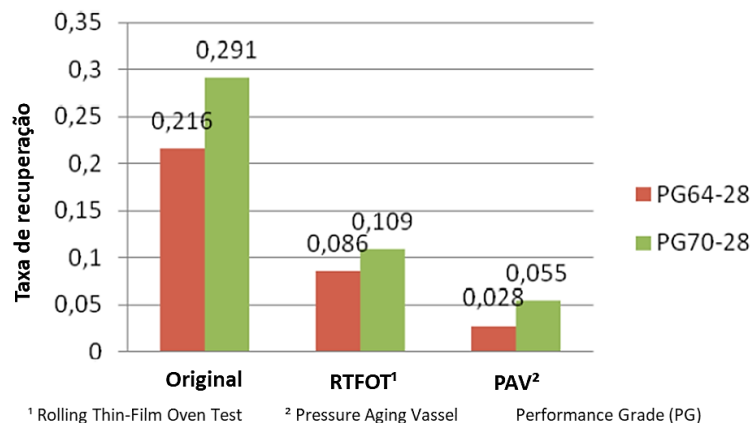
O nível de dano corresponde à redução na área de carregamento efetivo devido às cargas repetidamente aplicadas, estando diretamente relacionado a largura e a densidade das fissuras. Maiores níveis de dano indicam a necessidade de maior energia de ativação potencial para o material asfáltico recuperar. Ou seja, maior a energia necessária para difusão e aleatorização das moléculas de um lado para outro, que configura a energia mínima necessária para o ganho de resistência em função do tempo (SUN *et al.*, 2015).

2.3.2.8 Envelhecimento

O envelhecimento de misturas asfálticas é um processo complexo, com alterações em propriedades físico-químicas e mecânicas. No contexto mecânico, o envelhecimento altera características como aumento na viscosidade, no ponto de amolecimento e no módulo dinâmico ($|E^*|$) e reduz a penetração e o ângulo de fase. Sob a ótica físico-química, o envelhecimento da mistura asfáltica provoca alterações químicas no material, que resultarão em uma maior polarização do ligante asfáltico. Além disto, o tamanho das partículas de asfaltenos e micelas de resinas aumenta, fator este que está correlacionado ao aumento na viscosidade e atua de forma negativa na capacidade autorreparadora (VAN DEN BERGH, 2011).

A cicatrização de misturas asfálticas se caracteriza, não necessariamente, como um processo em longo prazo, podendo ocorrer em qualquer estágio da vida útil do material. Neste sentido, Shen e Sutharsan (2011) avaliaram o efeito do envelhecimento, tanto em curto quanto em longo prazo, no que tange a capacidade de recuperação coesiva de misturas asfálticas. O processo de envelhecimento foi realizado através de dois procedimentos: *Rolling Thin-Film Oven Test* (RTFOT) e *Pressure Aging Vassel* (PAV) e – para ambos os cenários – a capacidade de recuperação ao dano por fadiga do material apresentou decréscimo considerável (Figura 6).

Figura 6 - Efeito do envelhecimento na taxa de recuperação ao dano por fadiga de ligantes com grau de desempenho (*Performance grade – PG*) a altas e baixas temperaturas, respectivamente, de: 64-28 e 70-28.



Fonte: Adaptado de Shen e Sutharsan (2011).

2.4 TÉCNICAS DE AUTORREPARAÇÃO APLICADAS À MISTURA ASFÁLTICA

A autorreparação do material asfáltico pode ser classificada a partir de dois grupos: atributiva e funcional. No reparo atributivo, a finalidade é recuperar as características do sistema em seu estado original, ou seja, sua capacidade total. No reparo funcional, o objetivo é reestabelecer a função do sistema. Caso a funcionalidade total não possa ser recuperada, a estratégia adotada consistirá em concentrar os recursos restantes para maximizar a funcionalidade disponível (FISCHER, 2010).

Os estudos atuais com relação aos mecanismos empregados para aprimorar a capacidade autorreparadora de materiais asfálticos concentram-se em três modelos: (1) incorporação de nanopartículas, (2) aquecimento induzido e (3) rejuvenescimento (TABAKOVIĆ e SCHLANGEN, 2015).

2.4.1 Nanopartículas

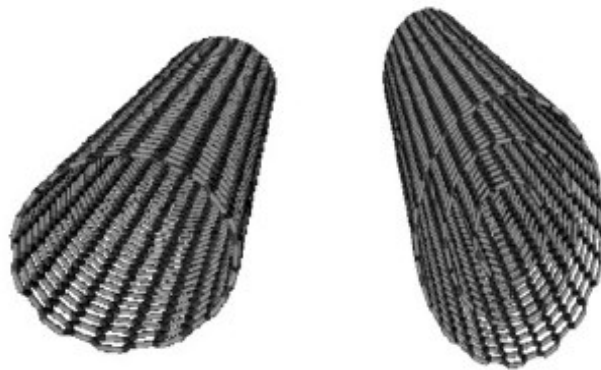
A pesquisa acerca da ciência e tecnologia de materiais aplicados à pavimentação está voltada tanto para macro quanto para microescala. Dentro deste contexto, a nanotecnologia tem gradualmente avançado nesta temática, sobretudo no que tange à sua capacidade de incrementar propriedades da mistura asfáltica através da modificação de ligantes. A microestrutura de um material é responsável pela determinação de suas macropropriedades. Desta forma, nano-modificações promovem uma melhora significativa em relação a aspectos fundamentais do asfalto (FANG *et al.*, 2013).

Um exemplo desta tecnologia são os nanotubos de carbono (NTC), materiais cuja aplicação em processos de engenharia se torna atrativa devido a suas propriedades térmicas, elétricas e mecânicas. No contexto da pavimentação asfáltica, os nanotubos de carbono caracterizam-se pela capacidade de melhorar o desempenho reológico de ligantes e misturas asfálticas, aumentando sua resposta elástica em baixas frequências e elevadas temperaturas (MOTLAGH *et al.*, 2012; STEYN *et al.*, 2013; MELO, 2014; ASHISH e SINGH, 2018).

Existem dois principais tipos de nanotubos de carbono: nanotubos de parede simples (*single-wall carbono nanotubes* – SWCNT) compostos por uma única folha de grafite perfeitamente envolta em um tubo cilíndrico, e nanotubos de paredes múltiplas

(*multiple-wall carbono nanotubes* – MWCNT) que consiste em uma matriz de nanotubos, dispostos concentricamente no interior um do outro (RAFIQUE e IQBAL, 2011; PUROHIT *et al.*, 2014). A produção dos diferentes tipos de NTCs se dá a partir de três principais técnicas: descargas por arco, ablação a laser e deposição química de vapor (AQEL *et al.*, 2012). A Figura 7 esquematiza os dois padrões de formação dos nanotubos de carbono.

Figura 7 - Representação esquemática de nanotubos de carbono de paredes simples e paredes múltiplas, respectivamente.



Fonte: Purohit *et al.*, (2014).

Além disto, pode-se citar como propriedades físico-mecânicas dos nanotubos de carbono: módulo de Young (ou módulo de elasticidade) da ordem de 1 TPa e tensão de resistência máxima (correspondente ao valor máximo de tensão que o material suporta antes de sofrer deformação ou romper) da ordem de 11.000 MPa a 63.000 MPa. Quanto a suas propriedades elétricas e térmicas, os nanotubos de carbono de paredes múltiplas são considerados materiais metálicos, ou seja, possuem como característica a capacidade de conduzir energia e calor (FONSECA, 2011).

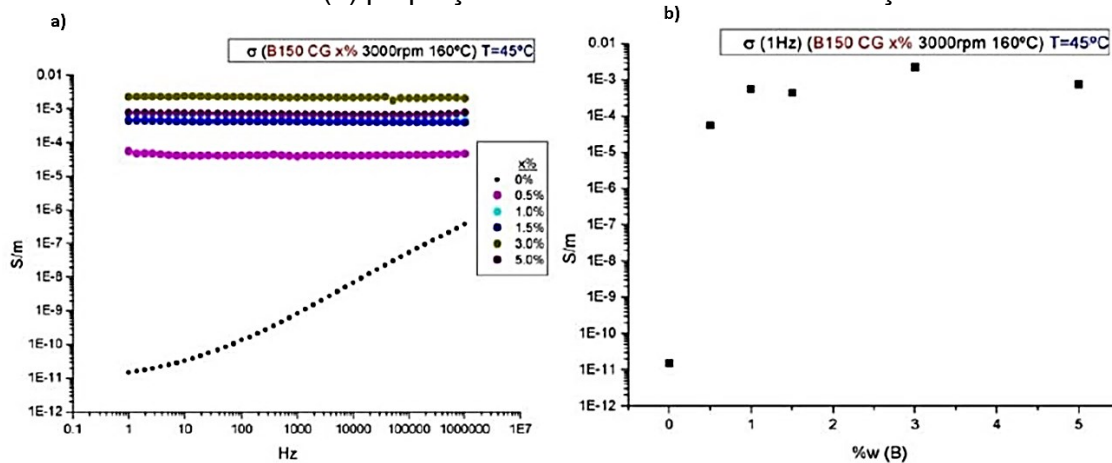
Ashish e Singh (2018) avaliaram a resistência à deformação permanente de ligantes modificados através da incorporação de diferentes proporções de nanotubos de carbono de múltiplas camadas. Diferentes abordagens foram empregadas para avaliação, dentre elas o parâmetro $G^*/\sin\delta$, a resposta de recuperação elástica, o valor de ZSV (*zero shear viscosity*), teste de fluência e o ensaio MSCR (*multiple stress creep recovery*). De acordo com os resultados obtidos, a incorporação de nanotubos de carbono auxilia significativamente na resistência à deformação permanente.

Quatro diferentes teores de MWCNTs (0,5%; 1,0%; 2,0% e 3,0%) foram empregados na modificação de um ligante asfáltico controle, de penetração 60/70. A análise demonstrou que o uso de nanotubos de carbono tem efeito considerável no desempenho de ligantes a alta temperatura (*PG Grade*), aumentando a temperatura de 64 °C para 76 °C (quando incorporados 3% de NTC sobre o peso de ligante asfáltico). Ainda, observou-se melhora nos parâmetros de deformação permanente e desempenho quando solicitado por tráfego pesado e sob ação de cargas repetidas (AMIN *et al.*, 2016).

Steyn *et al.* (2013) confrontaram a avaliação reológica de um ligante asfáltico virgem e sua modificação com teores de 0,5%, 1,0%, 2,0% e 5,0% de nanotubos de carbono, além da avaliação das alterações nas amostras após o envelhecimento a curto prazo pelo RTFOT. Entre os resultados obtidos, os autores apontam que conforme o teor de nanotubo de carbono é aumentado, verifica-se a redução da suscetibilidade do ligante asfáltico à deformação permanente através do aumento da rigidez do material em temperaturas elevadas. Entretanto, os autores apontam que este enrijecimento pode comprometer o desempenho do ligante asfáltico modificado em termos de resistência ao trincamento por fadiga, uma vez que para este fenômeno o comportamento desejado envolve menor rigidez a baixas temperaturas ou maior elasticidade do mesmo.

Além do incremento nas propriedades reológicas dos ligantes asfálticos, nanotubos de carbono também favorecem as propriedades de condutividade elétrica. Perez *et al.* (2016) avaliaram as alterações ocasionadas pela incorporação de diferentes teores (0%, 0,5%, 1,0%, 1,5%, 3,0% e 5,0% sobre peso de ligante) de NTC na capacidade de condução elétrica de um ligante asfáltico. Os autores constataram que a incorporação das diferentes proporções de NTC ocasionou a transição do material de isolante para semicondutor. As Figuras 8 (a) e 8 (b) apresentam o comparativo entre as modificações propostas no ligante asfáltico em termos de condutividade elétrica.

Figura 8 - Alteração na condutividade elétrica de um ligante asfáltico modificado com diferentes teores de NTC (0,5%, 1,0%, 1,5%, 3,0% e 5,0%) em termos de (a) frequência de ensaio e (b) proporção de NTC utilizada na modificação.



Fonte: Pérez *et al.*, (2016).

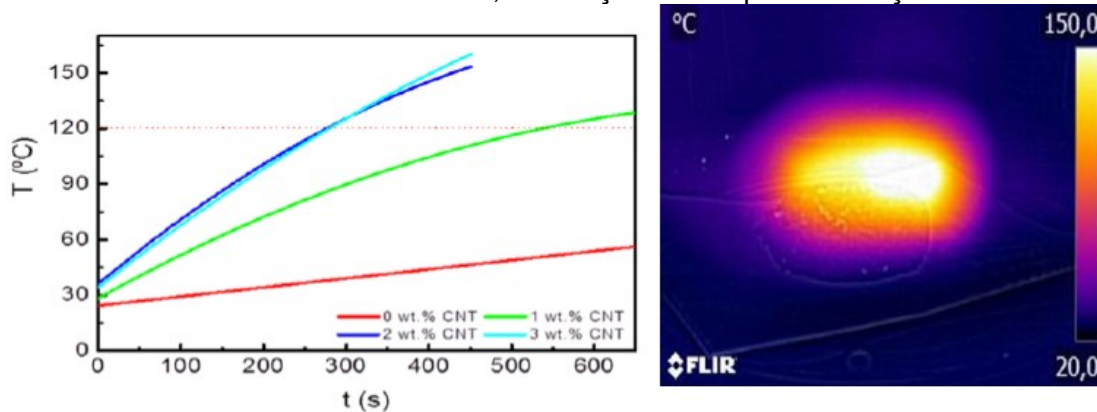
Através da análise do gráfico apresentado na Figura 8 (a), é possível observar que a condutividade elétrica aumenta até a fração volumétrica de nanotubos de carbono “ótima”, neste estudo representada pelo teor de 3%, onde a partir dessa tem-se uma redução na capacidade de condução elétrica. Esta observação é corroborada pela Figura 8 (b), onde tem-se o ponto máximo da curva no teor de 3% de NTC, a partir deste, tem-se um patamar de percolação, no qual maiores teores de incorporação não ocasionariam alterações expressivas no valor de condutividade já atingido.

Além disso, pode-se observar na Figura 8 (a) que a incorporação de NTC promoveu maior estabilidade nos ligantes modificados em função da alteração da frequência da corrente elétrica utilizada quando comparado ao ligante referência (sem NTC).

Yoo *et al.* (2018) constataram que a incorporação de 0,5% de nanotubos de carbono apresentou maior eficiência na capacidade de aquecimento por indução térmica de uma mistura asfáltica, quando comparado ao mesmo teor de materiais como: fibras de carbono e nanofibras de grafite. Pérez *et al.* (2016) observaram que a incorporação de nanotubos de carbono no ligante asfáltico (com a finalidade de aumento da temperatura do material asfáltico por indução térmica, em teores de 1%, 2% e 3%) formou uma rede de percolação na matriz asfáltica, aumentando a perda

dielétrica contra ondas eletromagnéticas e incrementando a absorbância do material; o que faz com que elevadas temperaturas sejam atingidas mais rapidamente. A Figura 9 apresenta o incremento na temperatura de misturas asfálticas com diferentes teores de nanotubos de carbono, em função do tempo de radiação.

Figura 9 - Aumento na temperatura de ligantes asfálticos contendo diferentes teores de nanotubos de carbono, em função do tempo de radiação.



Fonte: Pérez *et al.*, (2016).

Assim como os nanotubos de carbono, os nanopolímeros e as nanopartículas de borracha também são adicionados às misturas asfálticas com a finalidade de promover melhorias nas suas propriedades e aumentar o seu desempenho (FANG *et al.*, 2013). Em sua análise, Qiu *et al.* (2009) exploraram a capacidade reparadora de mástiques asfálticos produzidos a partir de um ligante modificado com adição de borracha. Dois tipos de nanopartículas de borracha foram ensaiados, NanoA e NanoB, além da produção de um mástique controle. As proporções de nanopartículas de borracha adicionadas variaram entre 0-5%, sendo 0% referente ao mástique controle.

No estudo de Qiu *et al.* (2009), as amostras ensaiadas (do tipo *dog bone*) foram cortadas ao meio e, sequencialmente, armazenadas durante quatro horas em temperatura ambiente (20-22 °C) para “cicatrizarem”. O mástique controle apresentou boa recuperação, superior a 70%. As amostras de mástique modificado apresentaram variações na recuperação, entre 15% e 90%, dependendo do tipo de nanopartícula de borracha empregado e da proporção de material incorporada.

2.4.2 Indução térmica e elétrica

Um dos fatores apontados como responsável pelo incremento da taxa de recuperação de misturas asfálticas é a temperatura. Por este motivo, a incorporação de mecanismos termo e eletricamente indutores tem sido proposto como facilitador da propriedade autorreparadora de materiais asfálticos através do estímulo térmico produzido (AGZENAY *et al.*, 2015; FRANESQUI *et al.*, 2017).

Concretos asfálticos eletricamente condutivos consistem em uma técnica relativamente nova, na qual filers e fibras eletricamente condutivas são adicionadas à mistura e posteriormente aquecidas por meio de um dispositivo termo indutor (LIU *et al.*, 2010). Dentre os materiais com propriedades de indução térmica e elétrica atualmente estudados estão: fibras de carbono, grafite, fibra de aço, lã de aço, fibras de alumínio, NTC e polímeros termocondutores. Estes estudos têm demonstrado que a resistividade elétrica varia significativamente em função do tamanho, tipo e forma dos filers e fibras (TABAKOVIĆ e SCHLANGEN, 2015). Na Tabela 2 são apresentados valores de parâmetros térmicos e/ou elétricos observados em pesquisas utilizando materiais com propriedade de indução, comparativamente ao agregado pétreo (granito cinza) e ao ligante asfáltico.

Tabela 2 - Comparativo entre parâmetros elétricos e térmicos de diferentes tipos de incorporações em relação ao agregado pétreo e ao ligante asfáltico.

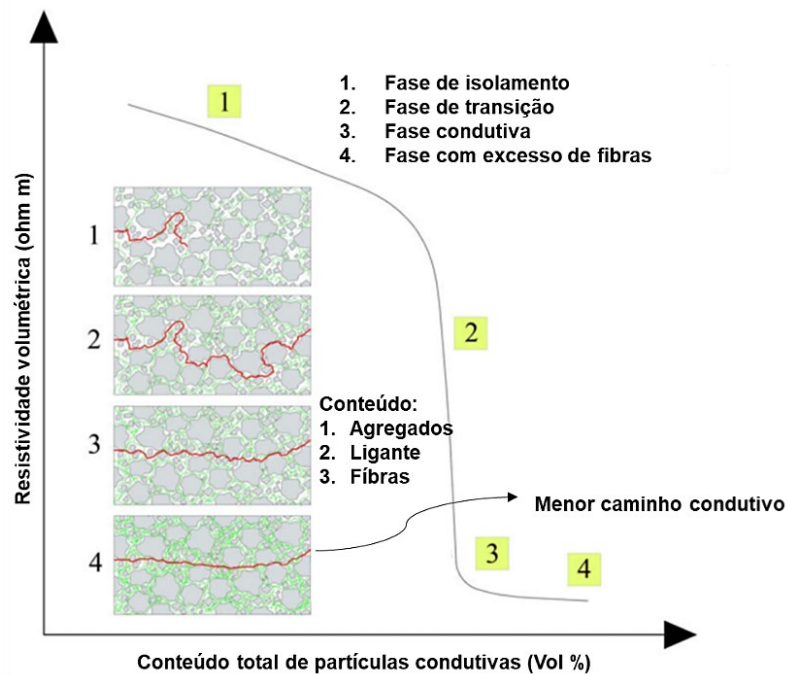
Material	Parâmetro	Valor	Unid.	Autor
Fibra de alumínio	Resistividade elétrica	$2,7 \times 10^{-8}$	$\Omega \cdot \text{cm}$	Ferreira (2017)
Fibra de carbono	Condutividade elétrica	106	S/m	Zhao <i>et al.</i> (2019)
Grafite	Resistividade elétrica	10^{-4}	$\Omega \cdot \text{cm}$	García <i>et al.</i> (2009)
Lã de aço	Resistividade elétrica	7×10^{-7}	$\Omega \cdot \text{cm}$	García <i>et al.</i> (2009)
NTC	Condutividade térmica	Ordem de 10^3	W/mK	Kumanek <i>et al.</i> (2019)
Granito cinza	Resistividade elétrica	849,9	$\Omega \cdot \text{m}$	Kahraman e Fener (2007)
Ligante asfáltico	Resistividade elétrica	$2,8 \times 10^{13}$	$\Omega \cdot \text{m}$	Wang <i>et al.</i> (2018)

Fonte: Elaboração própria, (2020).

Para melhor compreender a técnica de indução térmica e elétrica de misturas asfálticas, García *et al.* (2009b) propõe supor os elementos condutivos como sendo “caminhos” para os elétrons. Inicialmente, se bem distribuídas, as partículas condutivas estarão completamente isoladas umas das outras e a resistividade elétrica da mistura encontrar-se-á levemente inferior à de um mástique simples. À medida em

que os elétrons encontram partículas eletricamente condutivas, sua movimentação no interior da mistura é facilitada e a resistividade da mesma tenderá a cair. Quanto mais elementos interligarem-se, mais fácil será o fluxo de elétrons na mistura, até determinado ponto em que a associação de partículas criará um caminho que percorrerá a amostra completamente, aumentando sua condutividade significativamente. Por este motivo, a adição de fibras térmica e eletricamente condutivas apresenta-se superior à incorporação de fílers, conforme detalhando na Figura 10.

Figura 10 - Representação esquemática da associação de fibras condutivas na mistura asfáltica.



Fonte: Adaptado de García *et al.* (2009b).

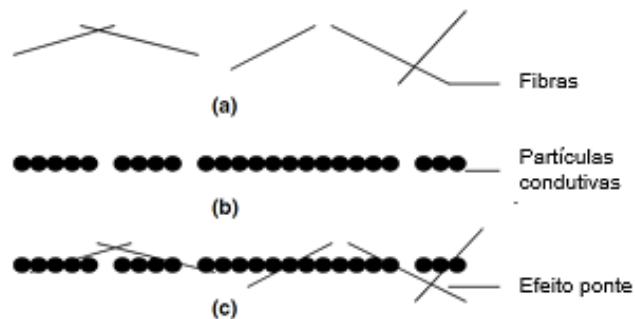
Quando o teor de partículas metálicas incorporadas corresponder à faixa ideal, ter-se-á a fase condutiva (fase 3), na qual a máxima dispersão das partículas e, conseqüentemente, a maior capacidade autorreparadora é verificada. Contudo, quando este limite é ultrapassado (fase 4), a resistividade da mistura comporta-se de maneira quase constante; indicando que teores de partículas metálicas acima do “teor ótimo”, resultam em baixa eficiência na redução da resistividade elétrica, além de elevar o custo de produção da mistura, sendo – portanto – menos indicados.

Para Wu *et al.* (2006), a condutividade resultante na mistura asfáltica é proporcional a quantidade de fibras e fíleres potencialmente condutivos adicionados.

Porém, a incorporação excessiva destes materiais tende a provocar a degradação do concreto asfáltico e afetar suas propriedades, como a resistência e a trabalhabilidade. Para os autores, a adição de fibras termo e eletricamente condutivas é mais eficiente que a adição de fíleres condutivos, em termos de incremento na condutividade.

Outro aspecto a ser observado na formação de caminhos potencialmente condutivos diz respeito ao chamado “efeito ponte”, que ocorre por meio da associação de materiais de maior dimensão (fibras ou fíleres) e materiais nanométricos (ex.: NTC). Wu *et al.* (2004) avaliaram a capacidade condutiva de misturas asfálticas através da incorporação de três diferentes materiais: negro de fumo (*carbon black*), grafite e fibras de carbono. Foi observada uma maior capacidade de condução elétrica para as misturas nas quais associou-se partículas de grafite ou negro de fumo às fibras de carbono. Os autores justificam esta melhora devido a formação dos caminhos condutivos, conforme representado na Figura 11.

Figura 11 - Representação esquemática de um caminho condutivo descontinuado (a) e (b) formado por fibras ou fíleres; (c) caminho condutivo potencializado pela combinação dos materiais (efeito ponte).



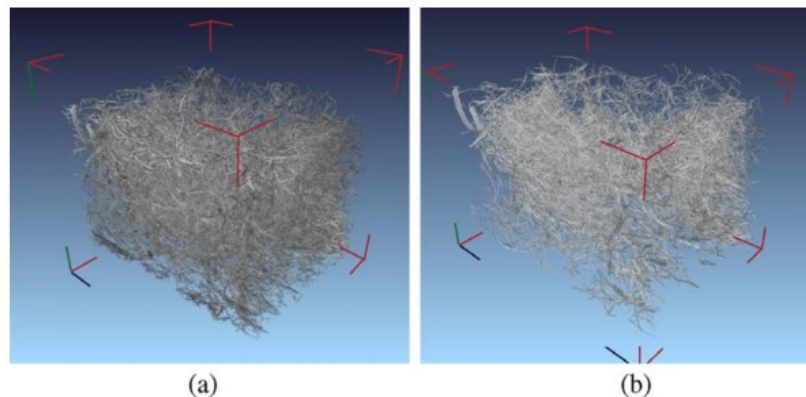
Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (2004).

Fransesqui *et al.* (2017) realizaram uma análise comparativa com o intuito de verificar o efeito do tipo, tamanho e proporção de diferentes partículas metálicas em relação a sua velocidade de aquecimento em laboratório. Ao todo foram moldadas 26 amostras cilíndricas – incluindo três amostras de referência, sem conter adição metálica – e três placas para cada uma das três diferentes misturas analisadas (concreto asfáltico semi-denso, mistura porosa e mistura do tipo *gap-graded*). No caso de misturas menos porosas, partículas metálicas menores (dimensão equivalente a

0,063 mm) revelaram-se ideais em termos de praticidade no uso e eficiência térmica (velocidade de aquecimento com baixo consumo de energia). Porém, para misturas porosas a incorporação de fibras curtas (5 mm) demonstrou melhor desempenho.

García *et al.* (2009b) testaram diferentes tipos de partículas eletricamente condutivas em uma mistura asfáltica padrão, moldada a partir de um ligante virgem (70/100) e agregados de sílica. As adições consistiram em fibra de lã de aço, com diâmetros variando entre 0,00635 mm e 0,00889 mm, cortadas à mão sempre pelo mesmo operador. O fíler foi composto por partículas de grafite, com dimensão inferior a 20 μm e porcentagem de carbono superior a 99%. A resistividade elétrica dos materiais foi de $7 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}$ e $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, respectivamente. Os autores concluíram que a relação agregado e ligante é um fator chave no projeto da mistura para fins de condutividade elétrica e que há um teor ótimo de partículas condutivas para cada relação. O excesso de partículas metálicas adicionadas à mistura asfáltica pode ocasionar o aparecimento de aglomerados de material no interior da mistura (Figura 12).

Figura 12 – Imagem de tomografia computadorizada (*nano scan*) das partículas no interior de uma amostra¹ de material asfáltico, onde: (a) porcentagem total de fibras e (b) apenas as fibras conectadas.



¹ A amostra analisada corresponde a uma mistura com porcentagem de fibras adicionadas equivalente a 6,54% de lã de aço, para uma relação agregado-ligante de 2,90.

Fonte: García *et al.* (2009b).

Na Figura 12 (b) é possível observar a redução no volume de fibras no interior da amostra quando são consideradas apenas as fibras conectadas. Além disto, também é possível observar as regiões onde estão localizados os aglomerados de partículas. Ainda assim, independentemente da disposição das partículas metálicas que compõe a amostra, em ambas as condições (Figura 12a e Figura 12b) as fibras

apresentam-se bem distribuídas ao longo da amostra, um dos requisitos para um aquecimento uniforme (GARCÍA *et al.*, 2009b).

A formação de aglomerados de partículas de lã de aço também foi constatada por Gallego *et al.* (2013). Durante sua pesquisa, três dimensões de partículas metálicas compuseram o plano experimental: partículas grosseiras (*coarse steel wool* – CSW) com fios de 0,10 a 0,12 mm de espessura; partículas medianas (*medium steel wool* – MSW) com variações de espessura entre 0,04 e 0,06 mm e, por fim, um grupo de espessura ainda menor (entre 0,01 e 0,02 mm). Quando incorporadas à mistura asfáltica, as partículas metálicas do terceiro grupo emaranharam-se umas às outras, formando aglomerados e dificultando a distribuição homogênea através da mistura asfáltica.

Dois técnicas têm sido empregadas para aumentar a velocidade de recuperação ao dano do material asfáltico através da elevação da temperatura. A primeira consiste em incorporar partículas metálicas à mistura, expondo-as a um campo eletromagnético alternado com frequência na ordem de Quilohertz, que induz uma corrente elétrica no material metálico, aumentando a sua temperatura (Lei de Joule) e, conseqüentemente, a temperatura do ligante. A segunda possibilidade envolve aquecer a mistura por meio da radiação de micro-ondas, onde o material também é exposto a um campo eletromagnético alternado, com frequência na ordem de Megahertz, resultando na movimentação e fricção interna das partículas, desencadeando o aumento da temperatura (NORAMBUENA-CONTRERAS e GARCÍA, 2016).

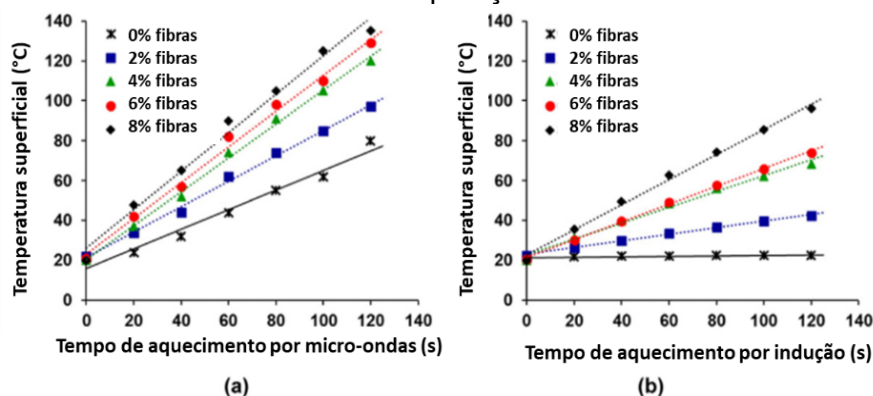
2.4.2.1 Indução térmica por meio de micro-ondas

Gallego *et al.* (2013) testaram diferentes porcentagens de lã de aço em uma mistura asfáltica, submetendo-a à indução de temperatura por meio de micro-ondas. Os corpos de prova contendo a incorporação metálica foram submetidos a períodos de aquecimento de 120 segundos, nos quais a temperatura superficial da amostra era verificada em intervalos consecutivos a cada 20 segundos. O comportamento verificado durante o procedimento de teste ocorreu de maneira similar ao verificado

em ensaios com indução de temperatura eletromagnética. De acordo com os autores, considerando a indução de temperatura por meio de micro-ondas, o volume necessário de lã de aço incorporado na mistura foi cerca de dez vezes menor quando comparado à termo indução.

Fibras de lã de aço fabricadas com aço de baixo carbono, densidade de 7,810 g/cm³, com diâmetro médio de 0,157 mm e comprimento variando entre 2 a 8 mm foram adicionadas a uma mistura asfáltica densa, a fim de comparar a eficiência entre as técnicas de indução de temperatura através de micro-ondas e por indução eletromagnética na capacidade autorreparadora da mistura, sob diversos ciclos de fratura e recuperação (NORAMBUENA-CONTRERAS e GARCÍA, 2016). A Figura 13 demonstra o comparativo entre a temperatura superficial das amostras para diferentes teores de fibra incorporados, em função do mecanismo termo indutor utilizado.

Figura 13 - Comparativo entre (a) micro-ondas e (b) termo indutor no que tange à eficiência na elevação da temperatura, em função do tempo de aquecimento para diferentes teores de incorporação.



Fonte: Adaptado de Norambuena-Contreras e García (2016).

De acordo com Norambuena-Contreras e García (2016), a temperatura superficial das amostras de concreto asfáltico aumenta ao longo do tempo de exposição à radiação de micro-ondas, além de atingir maiores valores para amostras com maior proporção de fibras metálicas incorporadas. Para misturas com 2% de fibras de lã de aço, obteve-se uma temperatura de 97 °C após um período de 120 segundos de exposição, enquanto para 8% de incorporação de fibras metálicas, neste mesmo período de tempo, a temperatura chegou a 135 °C. Em relação à mistura controle, em 120 segundos de exposição, a temperatura superficial medida foi 80 °C.

Zhu *et al.* (2017) avaliaram a capacidade autorreparadora de misturas asfálticas através de ensaios de fadiga em viga de quatro pontos com aquecimento induzido por micro-ondas. Após o módulo de rigidez das vigas de concreto asfáltico atingir 50% do valor inicial, as amostras foram divididas em seis grupos, submetidos a diferentes tipos de condicionamento. O primeiro grupo foi mantido em uma câmara climatizada a uma temperatura de 5 °C durante 15 horas e, em seguida, condicionado a 15 °C durante 3 horas. O segundo grupo foi armazenado em câmara climatizada a uma temperatura de 15 °C durante um intervalo de 18 horas. Os demais grupos foram aquecidos através de radiação de micro-ondas nas temperaturas de 30 °C, 45 °C, 55 °C e 80 °C, respectivamente; sendo posteriormente armazenados a 15 °C durante 18 horas. Os resultados de autorreparação para os diferentes tipos de condicionamento são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Resultados de autorreparação para mistura asfáltica com incorporação de pó de ferro nos diferentes condicionamentos.

Mistura asfáltica	Tempo de aquecimento (s)	Temperatura de aquecimento (°C)	Taxa de recuperação do módulo de rigidez	Taxa de extensão da vida de fadiga
Com partículas metálicas	0	15	0,716	0,289
	0	15	0,783	0,318
	30	30	0,750	0,518
	60	40	1,010	0,765
	120	55	1,087	1,332
	240	80	0,900	1,100
Simplex	120	55	0,776	0,915

Fonte: Zhu *et al.*, (2017).

As Equações 7 e 8 apresentam a formulação empregada pelos autores para obtenção da taxa de extensão da vida de fadiga das misturas asfálticas ensaiadas e a taxa de recuperação do módulo de rigidez, respectivamente.

$$HI_1 = \frac{\Delta f}{f} \quad (7)$$

$$HI_2 = \frac{S_{após} - S_{anterior}}{S_{inicial} - S_{anterior}} \quad (8)$$

Onde:

f : tempo de carregamento no qual o módulo de rigidez cai para o nível de dano especificado, anteriormente à autorreparação;

Δf : tempo de carregamento no qual o módulo de rigidez cai para o nível de dano novamente especificado, após a autorreparação;

$S_{inicial}$: módulo de rigidez inicial, anteriormente ao carregamento (MPa);

$S_{anterior}$: módulo de rigidez na flexão, anteriormente à autorreparação (MPa).

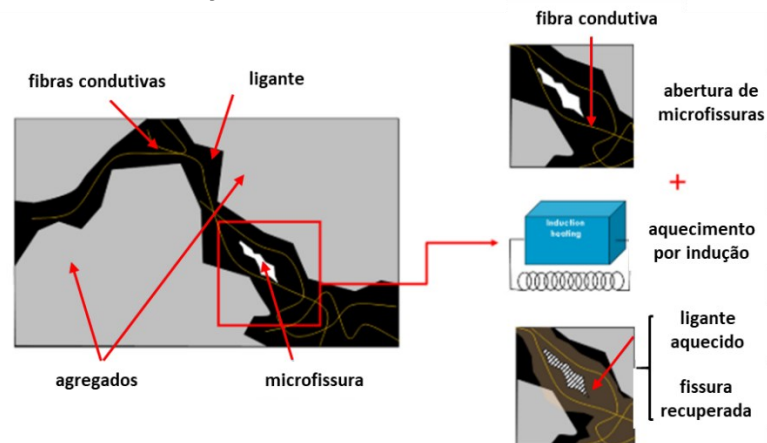
$S_{após}$: módulo de rigidez na flexão, após o processo de autorreparação (MPa);

2.4.2.2 Indução eletromagnética

Ao aplicar uma corrente elétrica alternada em uma bobina eletricamente condutiva, um campo eletromagnético de mesma frequência que a corrente elétrica empregada é produzido. Pela Lei de Indução de Faraday, ou Lei de Indução Eletromagnética, caso um material eletromagneticamente suscetível seja posto em contato com um campo magnético, ter-se-á a indução de uma corrente elétrica com a mesma frequência. A intensidade destas correntes, por sua vez, será proporcional à intensidade que circula no interior da bobina (GARCÍA *et al.*, 2009; 2012).

Isoladamente, o ligante asfáltico não apresenta capacidade de conduzir correntes elétricas (GARCÍA *et al.*, 2011). Por este motivo, fibras metálicas são incorporadas às misturas asfálticas com o objetivo de induzir correntes eletromagnéticas sob um campo magnético alternado, a fim de utilizar o calor produzido para desencadear o processo regenerativo das microfissuras presentes na mistura asfáltica e – consequentemente – aumentar a capacidade autorreparadora do material asfáltico; conforme esquematizado na Figura 14 (GARCÍA *et al.*, 2009a; LIU *et al.*, 2010; DAI *et al.*, 2013).

Figura 14 - Representação do efeito de autorreparação por termo indução.



Fonte: García *et al.*, (2009a).

Os sistemas de indução eletromagnética estudados envolvem os seguintes mecanismos: gerador de corrente alternada, bobinas indutoras, fibras e fileres eletricamente condutivos e amostras de mistura asfáltica. A operação do sistema consiste em conectar as bobinas indutoras ao gerador de corrente alternada, que quando posicionado sobre a amostra de concreto asfáltico com incorporação de partículas metálicas gera um campo magnético e este induz o aquecimento do material metálico contido na amostra, estimulando o ligante se autorreparar. Este processo pode ser aplicado repetidamente, sempre que houver a manifestação de dano no material (DAI *et al.*, 2013; TABAKOVIĆ e SCHLANGEN, 2015).

A fim de avaliar a capacidade reparadora de uma mistura asfáltica porosa através de indução eletromagnética, dois tipos de materiais metálicos foram incorporados – em diferentes proporções – à mistura. O primeiro tipo de material empregado consistiu em fibras de aço, com diâmetro variando entre 0,0296 mm e 0,1911 mm. O segundo material avaliado foi composto por lã de aço do tipo 000, com diâmetro entre 0,00635 mm e 0,00889 mm. Ambos os materiais foram cortados à mão, em diferentes tamanhos, sempre pelo mesmo operador. A adição de lãs de aço classe 000, mais longas, apresentou desempenho superior quando comparada a fibras de aço menores para tornar a mistura porosa condutiva e aumentar a velocidade de indução do aquecimento (LIU *et al.*, 2010).

Embora a indução eletromagnética aumente a capacidade autorreparadora das misturas asfálticas, o aumento da temperatura da mistura pode ter um efeito

negativo no envelhecimento da mesma (TABAKOVIĆ e SCHLANGEN, 2015). Outro aspecto a ser considerado é a perda de condutividade em função da oxidação (corrosão) das fibras metálicas incorporadas. Porém, uma possível solução para este tipo de problema está em substituir as fibras metálicas por fibras galvanizadas (WU *et al.*, 2006; TABAKOVIĆ e SCHLANGEN, 2015).

Pamulapati *et al.* (2017) testaram a velocidade de aquecimento de diferentes amostras de uma mesma mistura OGFC (*Open-Graded Friction Course* ou camada porosa de atrito) submetida a indução eletromagnética de temperatura até o valor limite de 110 °C. Foram analisadas uma mistura controle sem adição de partículas metálicas, uma mistura com incorporação de 5% de fibras de aço e uma mistura contendo 5% de fibras de alumínio. Durante um intervalo de 35 minutos, a amostra controle não apresentou elevação em sua temperatura sob exposição ao equipamento termo indutor. A amostra contendo fibras de aço atingiu a temperatura objetivo em 10 minutos e a amostra com fibras de alumínio após 30 minutos.

As amostras apresentam maior velocidade de aquecimento quando próximas à bobina do equipamento termo indutor, pois o campo magnético diminui com o distanciamento entre a amostra e o dispositivo (LIU *et al.*, 2010, 2011; GARCÍA *et al.*, 2012). Entretanto, não há um valor fixo para a altura na qual a bobina deve ser posicionada em relação à amostra de mistura asfáltica, alguns exemplos são obtidos a partir da avaliação de diferentes ensaios de Liu *et al.* (2010, 2011), onde alturas de 32 mm e 10 mm foram empregadas, sendo 10 mm a distância que apresentou maior velocidade de aquecimento. A Tabela 3 apresenta os resultados médios relativos à velocidade de aquecimento para uma mistura porosa com adição de lã de aço, aquecida durante um intervalo de três minutos.

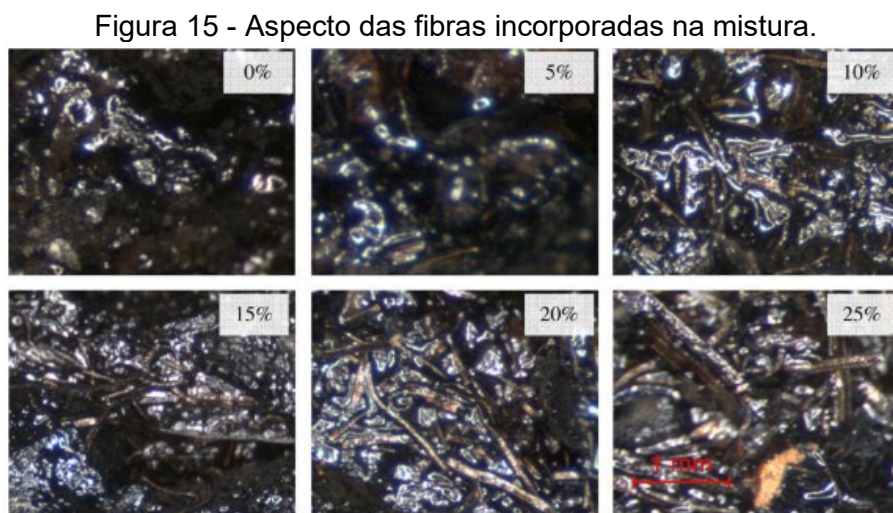
Tabela 3 - Velocidade média de aquecimento superficial variando a distância entre a bobina e a amostra.

Distância (mm)	Velocidade de aquecimento (°C/s)			
	1	2	3	Média
30	0,2197	0,2228	0,2239	0,2221
20	0,2475	0,2533	0,2642	0,2550
10	0,33	0,33	0,3622	0,3407

Fonte: Liu *et al.*, (2011).

2.4.2.3 Considerações acerca do uso de fibras metálicas

Diversas pesquisas (Gallego *et al.*, 2013; Garcia *et al.* 2009^a; 2009b; 2012; 2013; Liu *et al.*, 2010; 2011; Pamulapati *et al.*, 2017) avaliaram o efeito na capacidade de condução térmica e elétrica de materiais asfálticos gerado através da incorporação de fibras metálicas. Dentre as metodologias empregadas, ressalta-se a variação de três parâmetros relativos às fibras metálicas: diâmetro, comprimento e porcentagem de material a ser incorporado à mistura. A Figura 15 destaca o aspecto superficial de amostras de misturas asfálticas com diferentes porcentagens de fibras de lâ de aço incorporadas.



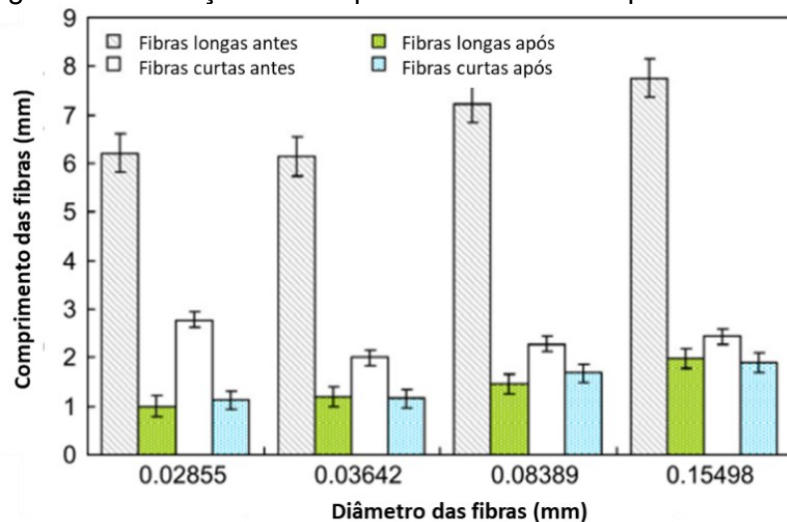
Fonte: Liu *et al.*, (2010).

No estudo de García *et al.* (2013), fibras metálicas de baixo carbono foram utilizadas para verificação do desempenho termo condutivo de mástiques e misturas asfálticas. As fibras empregadas consistiram em lâ de aço classe 0000 (diâmetro de 0,02855 mm), tipo 00 (diâmetro de 0,03642 mm), tipo 1 (0,08389 mm) e tipo 3 (diâmetro de 0,15498 mm). No que concerne ao comprimento inicial das fibras, foram utilizadas fibras curtas (2,5 mm) e fibras longas (7 mm). Os teores de material incorporados consistiram em 0% (mistura referência), 2%, 4% e 6%.

Após a mistura do material (160 °C, na velocidade de 312 rpm durante aproximadamente 5 minutos) e preparação dos corpos de prova, procedeu-se a extração de cerca de 50 fibras (de cada mistura) para posterior avaliação microscópica

das mesmas. Para fibras longas, houve uma redução de cerca de seis vezes o comprimento inicial; sobretudo para fibras com diâmetro de 0,15498. Para esse diâmetro, o comprimento inicial médio das fibras longas era 7,753 mm e para fibras curtas 2,437 mm. Como comprimento final, obteve-se: 1,981 mm para fibras longas e 1,894 mm para fibras curtas (GARCÍA *et al.*, 2013). A Figura 16 ilustra a análise realizada.

Figura 16 - Variação no comprimento das fibras após a mistura.



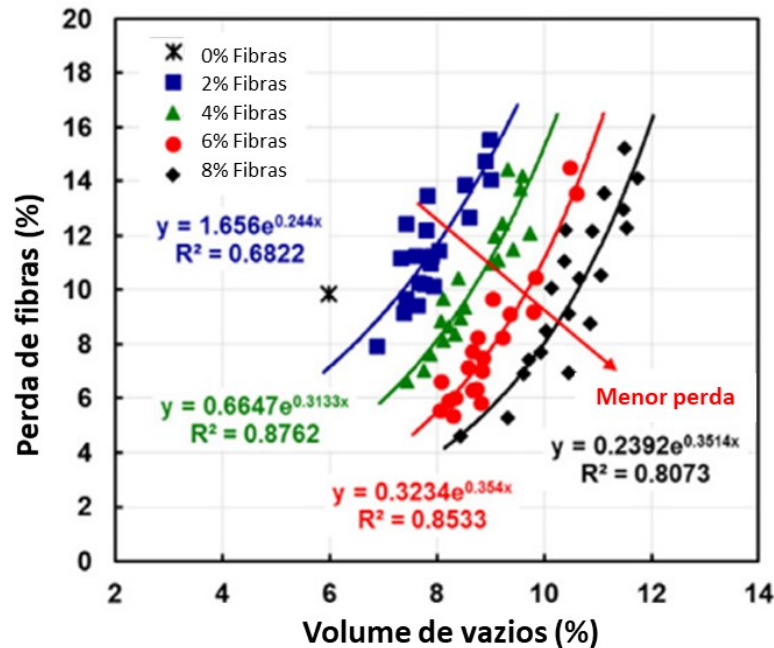
Fonte: Adaptado de García *et al.*, (2013).

Constatou-se que o comprimento final das fibras metálicas é majoritariamente influenciado pelo diâmetro das mesmas. Além disso, fibras metálicas com maiores diâmetros também apresentam maior resistência ao desgaste superficial e, conseqüentemente, ao seu “descolamento” da mistura. Em termos de porcentagem de material incorporado, maiores teores apresentaram menor resistividade térmica comprado a menores porcentagens de material. Para misturas contendo 6% de fibras metálicas, a resistividade medida foi 8,87 $\Omega.m$, enquanto teores de 2% de fibras metálicas apresentaram 10,27 $\Omega.m$ de resistividade elétrica. Contudo, maiores teores de fibras metálicas produzem misturas com maior volume de vazios (GARCÍA *et al.*, 2013).

Norambuena-Contreras e García (2016) avaliaram teores de fibras metálicas de 2%, 4%, 6% e 8% incorporados a uma mistura asfáltica densa. Dentre os aspectos considerados, foi verificado o aumento do volume de vazios da mistura à medida em que maiores teores de fibras metálicas foram empregados (sem alteração na distribuição granulométrica dos agregados minerais e no teor de ligante asfáltico).

Concomitantemente, observou-se aumento na resistência a perda por desgaste das fibras.

Figura 17 - Relação entre a perda de partículas por dano e volume de vazios, para diferentes teores de fibras metálicas.



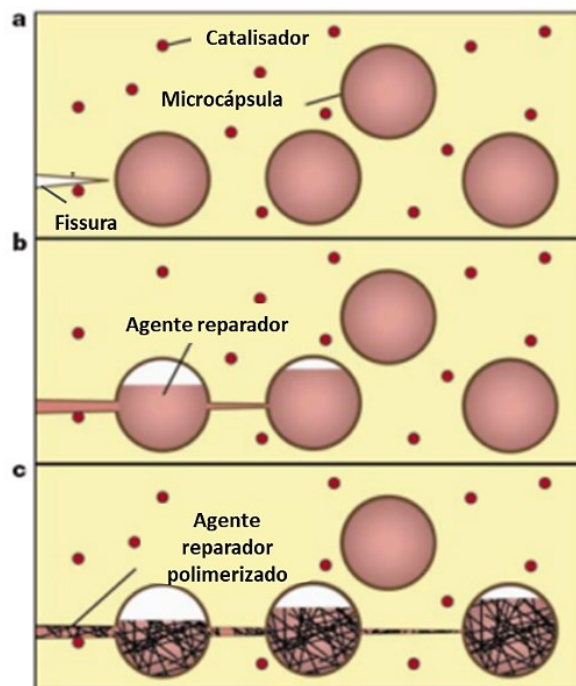
Fonte: Adaptado de Norambuena-Contreras e García, (2016).

2.4.3 Rejuvenescimento

A aplicação de agentes rejuvenescedores em misturas asfálticas tem como objetivo prolongar a vida útil do pavimento, reestabelecendo ou ajustando determinadas propriedades da mistura. Usualmente, os agentes rejuvenescedores são emulsões catiônicas modificadas que contém maltenos e ácidos saturados (BROWNRIDGE, 2010, SU *et al.*, 2015). Ao aplicar o agente rejuvenescedor diretamente sobre a camada asfáltica, a vida útil do pavimento pode ser ampliada por vários anos. Entretanto, este efeito é associado apenas a poucos centímetros da camada superior do pavimento asfáltico. Como alternativa, a inclusão de agentes rejuvenescedores através de microcápsulas com o intuito de autorreparar a mistura asfáltica tem sido estudada (BARRASA *et al.*, 2014; TABAKOVIĆ e SCHLANGEN, 2015).

Quando o processo de fissuração devido ao dano imposto à mistura asfáltica tem início (Figura 18a) próximo a uma microcápsula, o aumento da fissura tende a romper o material, fazendo com que o agente reparador seja liberado no interior da fissura através da ação de capilaridade (Figura 18b). No momento em que o agente reparador entra em contato com o catalisador, a reação de recuperação é desencadeada e tem início o reparo do material asfáltico (Figura 18c) (GARCÍA *et al.*, 2009a; QIU, 2012).

Figura 18 - Mecanismo de atuação de agentes rejuvenescedores encapsulados.



Fonte: Adaptado de Qiu, (2012).

Barrasa *et al.* (2014) desenvolveram dois métodos de encapsulamento para dois diferentes tipos de cápsula contendo agente rejuvenescedor como propriedade reparadora, com o intuito de verificar a habilidade autorreparadora de misturas asfálticas no que tange a extensão da vida útil do pavimento. As técnicas estudadas de encapsulamento polimérico e de encapsulamento em agregado poroso apresentaram-se eficientes na recuperação da mistura asfáltica e, também, no controle do envelhecimento. Além disto, os materiais ensaiados apresentaram adequada resistência a elevadas temperaturas e ao processo de mistura e compactação do concreto asfáltico, fatores importantes na garantia da durabilidade e eficiência no uso deste material.

De acordo com Su *et al.* (2015), o tamanho e o conteúdo das microcápsulas, bem como o tempo de atuação e a temperatura, são os principais fatores influenciadores deste tipo de mecanismo autorreparador. Desta forma, a quantidade de material rejuvenescedor liberado será dependente da espessura do material constituinte da microcápsula e da proporção entre o conteúdo e a cápsula, sendo 20 µm a dimensão que apresentou melhor homogeneidade na sua distribuição.

2.4.4 Resumo dos mecanismos ativadores da autorreparação

Em seu trabalho, Agzenai *et al.* (2015) elencam, de maneira resumida, os prós e contras associados às diferentes formas de potencializar a propriedade autorreparadora de ligantes e misturas asfálticas. Os dados apresentados pelos autores são listados na Tabela 4.

Tabela 4 - Prós e contras dos diferentes mecanismos ativadores da capacidade de autorreparação.

Mecanismo	Vantagens	Desvantagens
Micro-ondas	Aquecimento rápido, seletivo e uniforme da amostra; Maior reprodutibilidade e rendimento; Adequabilidade a questões ambientais; Fácil transporte e movimentação; Recuperação em múltiplos tempos.	Custo elevado; Dificuldade no controle da penetração, que depende essencialmente da frequência e das propriedades dielétricas do material; Maior tempo dispendido na avaliação do sistema e geometria; Necessidade de proteção para evitar interferência de outros equipamentos; Dependência da condutividade elétrica do material.
Indução eletromagnética	Permite aquecer materiais com baixa condutividade térmica; Transferível prontamente; Aquecimento rápido, seletivo e uniforme da amostra; Adequabilidade a questões ambientais; Recuperação em múltiplos tempos.	Atualmente não existem dados extensivos sobre resultados em campo; Elevado custo de construção; A taxa de recuperação é limitada; O mecanismo de aquecimento apresenta-se mais complicado que as técnicas convencionais; Dependência da condutividade elétrica do material.
Encapsulamento	Elevada taxa de recuperação; Boa compatibilidade.	Aplicabilidade uma única vez; Após lançar o agente rejuvenescedor, não há possibilidade de recarga do material na cápsula.

Fonte: Adaptado de Agzenai *et al.*, (2015).

Embora dependentes do dispositivo termo indutor, as alternativas de indução eletromagnética e por meio de micro-ondas mostram-se vantajosas em comparação ao mecanismo de encapsulamento, pois permitem maior número de intervenções devido ao mecanismo regenerador não depender da ativação e recarga de um agente reparador. Entretanto, tanto para a indução eletromagnética quanto para o aquecimento por micro-ondas, é importante estabelecer um nível de aquecimento das amostras no qual estas não se tornem suscetíveis à deformação e à desagregação devido a elevação demasiada da temperatura. A Tabela 5, apresentada a seguir, sintetiza algumas das temperaturas avaliadas na literatura e o efeito provocado por estas.

Tabela 5 - Síntese das temperaturas de aquecimento por indução eletromagnética e por meio de micro-ondas observadas na literatura.

Autores	Ano de Publicação	Temperatura (°C)			
Liu <i>et al.</i>	2010	70	85	-	-
Liu <i>et al.</i>	2012	70	85	-	-
Dai <i>et al.</i>	2013	60	80	100	-
Garcia <i>et al.</i>	2014	50	-	-	-
Garcia <i>et al.</i>	2015	50	-	-	-
Menozzi <i>et al.</i>	2015	55			
Pamulapati <i>et al.</i>	2017	110	-	-	-
Xiao	2017	50 a 60	70 a 120	-	-
Liu <i>et al.</i>	2017	45 a 95	85 (HMA ¹)	75 (WMA ²)	-
Fransesqui <i>et al.</i>	2017	52	-	-	-
Liu <i>et al.</i>	2017	60	70	80	90
Dinh <i>et al.</i>	2018	70	90	100	-

¹HMA – Hot Mix Asphalt (mistura asfáltica convencional)

²WMA – Warm Mix Asphalt (mistura asfáltica morna)

Fonte: Elaboração própria, (2020).

Em temperaturas muito elevadas, observa-se certa perda de adesão na mistura asfáltica, tornando-a deformável e suscetível a desagregação, conforme apontado por Garcia *et al.* (2014a, 2014b), Menozzi *et al.* (2015) e Liu (2012). Para contornar esta dificuldade, algumas pesquisas propõem que, ao atingir a temperatura de amolecimento do CAP, o ligante asfáltico passa a comportar-se como um fluido Newtoniano e tende a fluir por entre as fissuras através do fenômeno de capilaridade (Garcia, 2012), sendo então suficiente aquecer a mistura asfáltica apenas até este patamar. Ademais, conforme retratado por Menozzi *et al.* (2015) a faixa de temperatura próxima a 55 °C, promove um incremento na vida de fadiga de amostras

de concreto asfáltico (sob a ótica da autorreparação), enquanto valores superiores de aquecimento o nível de incremento obtido na vida de fadiga é menor (uma vez que temperaturas muito elevadas podem afetar a integridade dos corpos de prova).

2.4.5 Aplicação das técnicas de autorreparação em campo

No que tange à análise da capacidade autorreparadora de pavimentos asfálticos em campo, a técnica de autorreparação de misturas asfálticas através da incorporação de fibras metálicas e indução eletromagnética tem sido monitorada em uma camada de pavimento da rodovia holandesa A58 desde dezembro de 2010. A análise do desempenho faz parte de uma parceria entre a Universidade Tecnológica de Delft e a Dutch National Roads Authority (autoridade holandesa responsável pelo gerenciamento rodoviário do país) e tem se estendido até os dias atuais (SCHLANGEN, 2013 apud TABAKOVIĆ e SCHLANGEN, 2015).

2.5 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA AUTORREPARAÇÃO

2.5.1 Ensaios para avaliação da mistura asfáltica

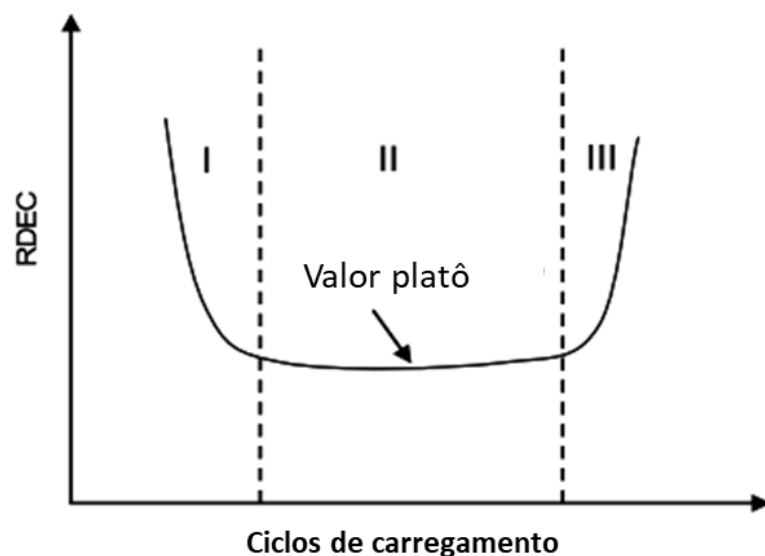
A fim de comparar a capacidade autorreparadora natural à termicamente induzida e avaliar a influência da amplitude de deformação na taxa de reparo, Liu *et al.* (2012) conduziram ensaios de fadiga em viga quatro pontos com amplitudes de deformação de 200, 250, 300 e 400 *microstrains* e frequência de 8 Hz. A partir da redução da rigidez na flexão em 50% do valor inicial, decompôs-se as amostras do ensaio em dois conjuntos: com período de repouso de 18 horas imediatamente após a indução do dano e outro com o aquecimento a 70 °C, através do equipamento termo indutor, e posterior período de repouso de 18 horas. A segunda parte da análise consistiu em reensaiar as amostras quanto à fadiga. A extensão da vida de fadiga obtida no segundo carregamento foi adotada como indicativo da capacidade de autorreparação para as diferentes condições apresentadas.

A cicatrização ou autorreparação de misturas asfálticas é historicamente considerada como um fenômeno decorrente de intervalos de repouso, nos quais o

dano é revertido à medida em que ocorre a reaproximação da interface ligante-agregado. No entanto, este fenômeno consiste em uma reação físico-química contínua que pode ocorrer não apenas durante períodos de repouso, mas também durante o desenvolvimento do carregamento (CARPENTER *et al.*, 2003).

Entre os fundamentos empregados em análises de resistência à fadiga, o conceito de taxa de mudança da energia dissipada ou *Ratio Dissipated Energy Change – RDEC* tem sido associado à capacidade cicatrizante de materiais asfálticos. A plotagem da curva da taxa de mudança da energia dissipada *versus* o ciclo de carregamento apresenta três estágios característicos, cujo segundo estágio (período platô) indica o período no qual uma parcela de energia é constantemente transformada em dano. Baixos valores de platô estão associados à maior vida de fadiga (QIU, 2012; MELO 2014). A Figura 19 corresponde à representação gráfica típica das três fases de comportamento da RDEC.

Figura 19 - Fases de comportamento RDEC.



Fonte: Adaptado de Qiu (2012).

Carpenter e Shen (2006), empregaram a abordagem RDEC a fim de obter os valores de platô (*Plato Value - PV*) na autorreparação, para diferentes tempos de repouso. A análise foi realizada através de ensaios de fadiga em viga quatro pontos com nível de deformação de 500 *microstrains*, frequência de 10 Hz, temperatura de ensaio de 20 °C e períodos de repouso de 0, 1, 3 e 9 segundos. Os autores apontam

que a recuperação do PV por segundo de tempo de repouso constitui um indicativo da capacidade de cicatrização da mistura asfáltica.

García *et al.* (2014) avaliaram a capacidade autorreparadora de misturas asfálticas com a incorporação de fibras de aço através de ensaios de flexão em três pontos, realizados no interior de uma câmara climatizada com temperatura de -20 °C. Previamente, os corpos de prova foram mantidos à temperatura de ensaio durante um período de duas horas, com o intuito de evitar gradientes de temperatura no interior da amostra. As configurações de ensaio envolveram: distanciamento entre apoios inferiores de 8 cm e aplicação de carga a uma taxa de 0,05 mm/min. O ensaio foi interrompido quando a curva de descarregamento atingiu o valor de 20 kN. Sequencialmente, as amostras foram submetidas a um período de repouso de duas horas, com indução de aquecimento em tempos pré-estabelecidos e, por fim, novamente ensaiadas sob flexão em três pontos.

Pronk (2001) propôs um modelo de análise da capacidade reparadora de misturas asfálticas através de ensaios de fadiga em quatro pontos. Este modelo, intitulado *PH Model ou Partial Healing Model*, pode ser empregado para previsão da evolução do módulo dinâmico devido ao dano reversível e irreversível, bem como a autorreparação após a aplicação de tempos de repouso. O processo de análise simula matematicamente a perda e o armazenamento do módulo através de ciclos de fadiga/cicatrização. A metodologia também sugere que o processo de autorreparação de misturas asfálticas ocorre não apenas durante períodos de repouso, mas também durante ciclos de carregamento; concordando com a observação proposta por Carpenter *et al.* (2003).

Durante a execução de um ensaio de tensão direta com deformação controlada, a relação tensão-deformação combina dois fatores fundamentais: a indução do dano e o relaxamento devido ao comportamento viscoelástico do material asfáltico. Assim, a cicatrização de misturas asfálticas também pode ser avaliada a partir de ensaios mecânicos apoiados no Modelo VECD (*visco-elastic continuum damage* ou teoria do dano contínuo) (KIM *et al.*, 1997 *apud* QIU, 2012). Dessa forma, um modelo de análise adequado deve eliminar a influência de parâmetros reológicos

em função da dependência da metodologia de carregamento empregada, bem como da relação tempo/temperatura (QIU, 2012).

Diferentes proporções de fibras metálicas incorporadas em uma mistura asfáltica porosa foram submetidas à indução eletromagnética de temperatura e posteriormente avaliadas por meio de quatro metodologias de ensaio: flexão em três pontos, ensaio de tração indireta, ensaio de torção em base elástica e, por fim, flexão em quatro pontos. Com exceção do ensaio de tração indireta, realizado em amostras cilíndricas, todos os demais empregaram amostras prismáticas retangulares (vigotas). Dentre os resultados, constatou-se que a taxa de cicatrização de misturas porosas é dependente do nível de deformação induzido, com maiores taxas de reparação para maiores amplitudes de *microstrains*. Outro fator observado – e fortemente ressaltado na literatura – é a influência da temperatura, sendo constatado que o superaquecimento das misturas asfálticas provoca o decréscimo na taxa de cicatrização (LIU, 2012).

2.6 ÍNDICE DE AUTORREPARAÇÃO

Ao longo dos estudos acerca da propriedade autorreparadora de materiais asfálticos, diversos autores têm proposto avaliar esta característica através da estimativa do índice de cicatrização do material. Para Liu *et al.* (2012), este índice pode ser descrito como o ganho na vida de fadiga (Δf) após a indução do dano, dividido pela sua correspondente vida de fadiga inicial (f). Da mesma forma, Xiao (2017) apresenta uma descrição detalhada da metodologia de cálculo para obtenção do índice de cicatrização das misturas asfálticas e infere que, quanto maior o índice de cicatrização, mais significativas as propriedades autorreparadoras daquele material. As etapas abordadas são apresentadas a seguir.

HI¹: O *healing index* 1 ou “índice de autorreparação 1” é definido através da taxa de crescimento do módulo de cisalhamento dinâmico, antes e após a cicatrização.

$$HI^1 = \frac{|G^*|_{após} - |G^*|_{antes}}{|G^*|_{antes}} \quad (9)$$

Onde:

$|G^*|_{antes}$: módulo de cisalhamento dinâmico anteriormente ao reparo (MPa);

$|G^*|_{após}$: módulo de cisalhamento dinâmico após o reparo (MPa).

HI^2 : Adaptando a Equação 9, o *healing index 2* ou “índice de autorreparação 2” pode ser obtido através do módulo de cisalhamento dinâmico inicial do material e o correspondente valor após o processo de reparo.

$$HI^2 = \frac{|G^*|_{após}}{|G^*|_{inicial}} \quad (10)$$

Onde:

$|G^*|_{após}$: módulo de cisalhamento dinâmico inicial da amostra.

Diversas outras formulações têm sido empregadas com a finalidade de quantificar o índice de cicatrização de materiais asfálticos, cada uma com suas particularidades. Xiao (2017) destaca que, baseados nas formulações apresentadas, alguns pesquisadores propõem considerar a relação de densidade de energia; a fim de otimizar a metodologia.

$$E_i = \sigma \times \varepsilon \times N \quad (11)$$

Onde:

E_i : corresponde à densidade de energia em um dado momento;

σ : tensão em um determinado ponto;

ε : deformação em um determinado ponto;

N : número de ciclos de aplicação da carga.

Desta forma, a equação representativa do índice de cicatrização considerando a densidade de energia é apresentada na Equação 11. Esta formulação final torna-se mais expressiva, pois seu desenvolvimento não considera apenas os valores de módulo iniciais e finais, ou previamente ao ensaio e após a cicatrização do material;

mas sim a densidade para cada ponto correspondente à densidade de energia acumulada e, portanto, melhor representando as propriedades mecânicas totais do material (antes e após a cicatrização) (XIAO, 2017).

$$HI^3 = \frac{\sum \varepsilon_{posterior}}{\sum \varepsilon_{anterior}} \quad (14)$$

2.7 RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS

As características relativas às incorporações estudadas ao longo da revisão bibliográfica e que servirão como base para a execução do plano experimental proposto no Capítulo 3 são apresentadas, em ordem cronológica, de forma sucinta na relação a seguir. Ressalva-se que o quadro resumo apresentado não tem como objetivo concluir sobre qual o tipo, dimensão e teor ideal de incorporação (sendo necessário para isto uma avaliação mais detalhada dos diferentes parâmetros que podem balizar esta escolha). Seu objetivo principal é caracterizar as incorporações estudadas na literatura, em termos de teores incorporados, dimensões e tipos de materiais aplicáveis, a fim de embasar as próximas etapas do estudo.

Quadro 2: Filtragem das características de incorporações, tipo de materiais, teores e mecanismo de aquecimento verificados na literatura.

Autor	Título	Ano	Tipo de adição	Legenda:		Aquecimento por termo indução			Aquecimento por micro-ondas		
				Teor (%)	Diâmetro (mm)			Comprimento (mm)			
Wu et al.	Self-monitoring electrically conductive asphalt-based composite containing carbon fillers	2006	Grafite em pó	30 a 40	150 µm	-	-	-	-	-	-
García et al.	Electrical conductivity of asphalt mortar containing conductive fibers and fillers	2009	Fibra de lã de aço	5,83	0,00635	0,00889	-	-	-	-	-
				6,54	0,00635	0,00889	-	-	-	-	-
				8,76	0,00635	0,00889	-	-	-	-	-
			Grafite		20 µm	20 µm	-	-	-	-	-
Liu et al.	Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete	2010	Fibra de lã de aço	0 a 20	0,02960	0,19110	-	-	-	-	-
			Fibra de lã de aço	0 a 20	0,00635	0,00889	-	-	-	-	-
García et al.	Induction heating of mastic containing conductive fibers and filler	2011	Fibra de lã de aço	7,50	0,00635	0,00889	-	-	-	-	-
					0,00635	0,00889	-	-	-	-	-
					0,00635	0,00889	-	-	-	-	-
			Grafite	14,67	20 µm	20 µm	-	-	-	-	-
Liu et al.	Evaluation of the induction heating effect of porous asphalt concrete through four point bending fatigue test	2012	Fibra de lã de aço	1,27	8,89 µm	12,79 µm	-	-	10,00	-	-
García	Self-healing of open cracks in asphalt mastic	2012	Fibra de lã de aço	7,50	0,00635	0,00889	-	-	7,00	-	-
García et al.	Optimization of composition and mixing process of a self-healing porous asphalt	2012	Fibra de lã de aço	2,00	0,00890	0,01270	-	-	5,80	-	-
				4,00	0,00890	0,01270	-	-	5,80	-	-
				6,00	0,00890	0,01270	-	-	5,80	-	-
García et al.	A simple model to define induction heating in asphalt mastic	2012	Fibra de lã de aço	2,00	0,00890	0,01270	-	-	7,00	-	-
				4,00	0,00890	0,01270	-	-	7,00	-	-
				6,00	0,00890	0,01270	-	-	7,00	-	-
Dai et al.	Investigation of induction healing effects on electrically conductive asphalt mastic and asphalt concrete beams through fracture-healing tests	2013	Fibra de lã de aço (mástique)	5,66	-	-	-	-	6,50	-	-
			Fibra de lã de aço (mistura)	8,00	-	-	-	-	6,50	-	-
Gallego et al.	Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing	2013	Fibra de lã de aço (CSW)	0,20 a 1,80	0,10	0,12	-	-	5,00	10,00	-
			Fibra de lã de aço (MSW)	0,20 a 1,80	0,04	0,06	-	-	5,00	10,00	-

García et al.	Experimental evaluation of dense asphalt concrete properties for induction heating purposes	2013	Lã de aço de baixo carbono	0,00	0,02855	0,03642	0,083899	0,15498	2,50	7,00	-		
				2,00	0,02855	0,03642	0,083899	0,15498	2,50	7,00	-		
García et al.	Experimental evaluation of dense asphalt concrete properties for induction heating purposes	2013	Lã de aço de baixo carbono	4,00	0,02855	0,03642	0,083899	0,15498	2,50	7,00	-		
				6,00	0,02855	0,03642	0,083899	0,15498	2,50	7,00	-		
García et al.	Influence of Steel Wool Fibers on the Mechanical, Termal, and Healing Properties of Dense Asphalt Concrete	2014	Fibra de lã de aço de baixo carbono	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	
				2,00	0,02855	0,03642	0,08389	0,15498	2,50	7,00	-		
				4,00	0,02855	0,03642	0,08389	0,15498	2,50	7,00	-		
				6,00	0,02855	0,03642	0,08389	0,15498	2,50	7,00	-		
Apostodilis et al.	Advanced evaluation of asphalt mortar for induction heating purposes	2016	Pó de ferro	5,00	0,08300	-	-	-	2,50	-	-		
				10,00	0,08300	-	-	-	2,50	-	-		
				15,00	0,08300	-	-	-	2,50	-	-		
				20,00	0,08300	-	-	-	2,50	-	-		
				25,00	0,08300	-	-	-	2,50	-	-		
				Fibra de lã de aço	4,00	0,08300	-	-	-	2,50	-	-	
Apostodilis et al.	Towards an Experimental Protocol for the Study of Induction Heating in Asphalt Mastics Towards an Experimental Protocol for the Study of Induction Heating in Asphalt Mastics	2016	Pó de Ferro	5,00	-	-	-	-	Substituindo parte do filer da mistura de agregados pelo pó de ferro				
				10,00	-	-	-	-					
				20,00	-	-	-	-					
				25,00	-	-	-	-					
				50,00	-	-	-	-					
				75,00	-	-	-	-					
				100,00	-	-	-	-					
							25,00	-					-
					50,00	-	-	-	-				

Norambuena-Contreras e García	Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating	2016	Fibra de lã de aço de baixo carbono	2,00	0,15700	-	-	-	2,00-8,00	-	-
				4,00	0,15700	-	-	-	2,00-8,00	-	-
				6,00	0,15700	-	-	-	2,00-8,00	-	-
				8,00	0,15700	-	-	-	2,00-8,00	-	-
Yang et al.	Effects of amorphous metallic fiber fibers on the properties of asphalt concrete	2016	Fibras metálicas amorfas	0,50 a 1,50	0,03200	-	-	-	10,00	15,00	30,00
Pamulapati et al.	Evaluation of self-healing of asphalt concrete through induction heating and metallic fiber	2017	Fibra de lã de aço	2,50	0,04000	-	-	-	-	-	-
				5,00	0,04000	-	-	-	-	-	-
			Alumínio	5,00	0,03000	-	-	-	-	-	-
Sun et al.	Self-healing performance of asphalt mixtures through heating fibers or aggregate	2017	Fibra de aço	6,00	-	-	-	-	4,20	-	-
Liu et al.	A comparative study of the induction healing behaviors of hot and warm mix asphalt	2017	Fibra de aço	6,00	40-60 µm	20-50 µm	70-130 µm	-	3,30	3,50	4,20
Fransqui et al.	Top-down cracking self-healing of asphalt pavements with steel filler from industrial waste applying microwaves	2017	Fibra de lã de aço	Diversas	0,30000	0,40000	-	-	5,00	10,00	-
			Limalha de aço	Diversas	0,50000	1,00000	-	-	1,00	2,00	-
			Limalha de aço (90%) e Coríndon (10%)	Diversas	<0,063	-	-	-	0,06	0,50	-
Zhu et al.	Self-healing efficiency of ferrite-filled asphalt mixture after microwave irradiation	2017	Pó mineral		-	-	-	-	-	-	-
			Pó de Ni-Zn		-	-	-	-	-	-	-
Dihn et al.	Healing Performance of Granite and Steel Slag Asphalt Mixtures Modified with Steel Wool Fibers	2018	Fibra de lã de aço	4,00	70-130 µm	-	-	-	3,00-5,50	-	-
				5,00	70-130 µm	-	-	-	3,00-5,50	-	-
				6,00	70-130 µm	-	-	-	3,00-5,50	-	-
			Escória de aço	30,00		-	-	-	Substituindo parte do filler		
Gonzáles et al.	Self-healing properties of recycled asphalt mixtures containing metal waste: An approach through microwave radiation heating	2018	Escória de aço	1	1,31	-	-	-	3,00-20,00	-	-
			Escória de aço	2	1,31	-	-	-	3,00-20,00	-	-
			Escória de aço	4	1,31	-	-	-	3,00-20,00	-	-
Yoo et al.	Self-healing capability of asphalt concrete with carbon-based materials	2019	Fibra de carbono	0,50 e 1,00	7000 nm	-	-	-	12000 µm	-	-
			Nanotubo de Carbono	0,50	5-20 nm	-	-	-	10 µm	-	-
			Nanofibras de grafite	0,50	50-200 nm	-	-	-	10-30 µm	-	-

Apostodilis et al.	Effect of synthetic fibers on fracture performance of asphalt mortar	2019	Fibras de aramida	Fabricante	-	-	-	-	-	-	-	-
			Fibras de poliolefina	Fabricante	-	-	-	-	-	-	-	-
Gonzáles et al.	Microwave crack healing on conventional and modified asphalt mixtures with different additives: an experimental approach	2019	Fibra de lã de aço	4	0,133	-	-	-	2,00-14,00	-	-	-
			Escória de aço	4	1,31	-	-	-	3,00-21,00	-	-	-
			Carbeto de Cílcio	5,2	2,8 (máx)	-	-	-	-	-	-	-

Ao observar o Quadro 2, verifica-se o crescente interesse da comunidade acadêmica acerca da propriedade regeneradora de materiais asfálticos, sobretudo com o intuito de potencializá-la a partir da incorporação de materiais termo e eletricamente condutivos. Em relação a estes materiais, observa-se a existência de uma variada gama de incorporações. Porém, a fibra de lã de aço apresenta expressiva utilização, seguida pelos materiais originados do grafite. Uma vez que as fibras metálicas apresentam vasta utilização, constituem características importantes das mesmas: comprimento e diâmetro. Embora não sejam caracterizadas em todos os estudos apresentados, as faixas de comprimento de maior aplicação estão situadas no intervalo entre 4 e 7 mm (conforme demonstrado no Quadro 2). Ademais, o diâmetro de maior ocorrência nas fibras metálicas estudadas está situado no intervalo entre 80 e 150 μm , enquanto para os demais materiais têm-se diâmetros reduzidos (da ordem de 20 μm).

Com relação aos teores de incorporação, embora não exista um valor fixo (ou ideal, havendo a necessidade de estudos mais aprofundados para a obtenção do teor ótimo de incorporações) as porcentagens mais usuais encontram-se no intervalo entre 4 e 8%. Por fim, a fonte externa de aquecimento com maior utilização corresponde à indução eletromagnética (utilizando um equipamento termo indutor composto por um sistema de bobinas e gerador de corrente elétrica). Entretanto, devido a seu custo-benefício, é possível utilizar o equipamento de micro-ondas para aquecimento das amostras.

2.8 SÍNTESE DO REFERENCIAL TEÓRICO

Características como diâmetro, comprimento e teor das fibras de lã de aço incorporadas ao material asfáltico possuem relação direta com o nível de recuperação que se pretende obter. Fibras de maior diâmetro (nº 1 e 2) apresentam maior eficiência no aquecimento das amostras, bem como maior controle da redução no comprimento imposta pelo processo de mistura. Menores comprimentos (cerca de 4 mm) estão relacionados a uma melhor distribuição das fibras na matriz asfáltica.

Entretanto, não há consenso na literatura quanto ao teor ótimo de fibras metálicas e nanotubos de carbono a ser incorporado nas misturas asfálticas visando termo indução, sendo necessária a exploração de diversas porcentagens de fibra e a avaliação da alteração que estas ocasionam em parâmetros da mistura asfáltica, como parâmetros elétricos, térmicos e mecânicos.

A propriedade do material de conduzir correntes elétricas também configura um fator de grande relevância no incremento da temperatura. Embora o aumento da temperatura conduza a maiores índices de reparação, como efeito indesejado ocasionam deformações e até mesmo a perda de adesão na mistura. É retratada, também, a existência de uma temperatura “limite” para reparação, acima da qual a capacidade regenerativa tende a reduzir.

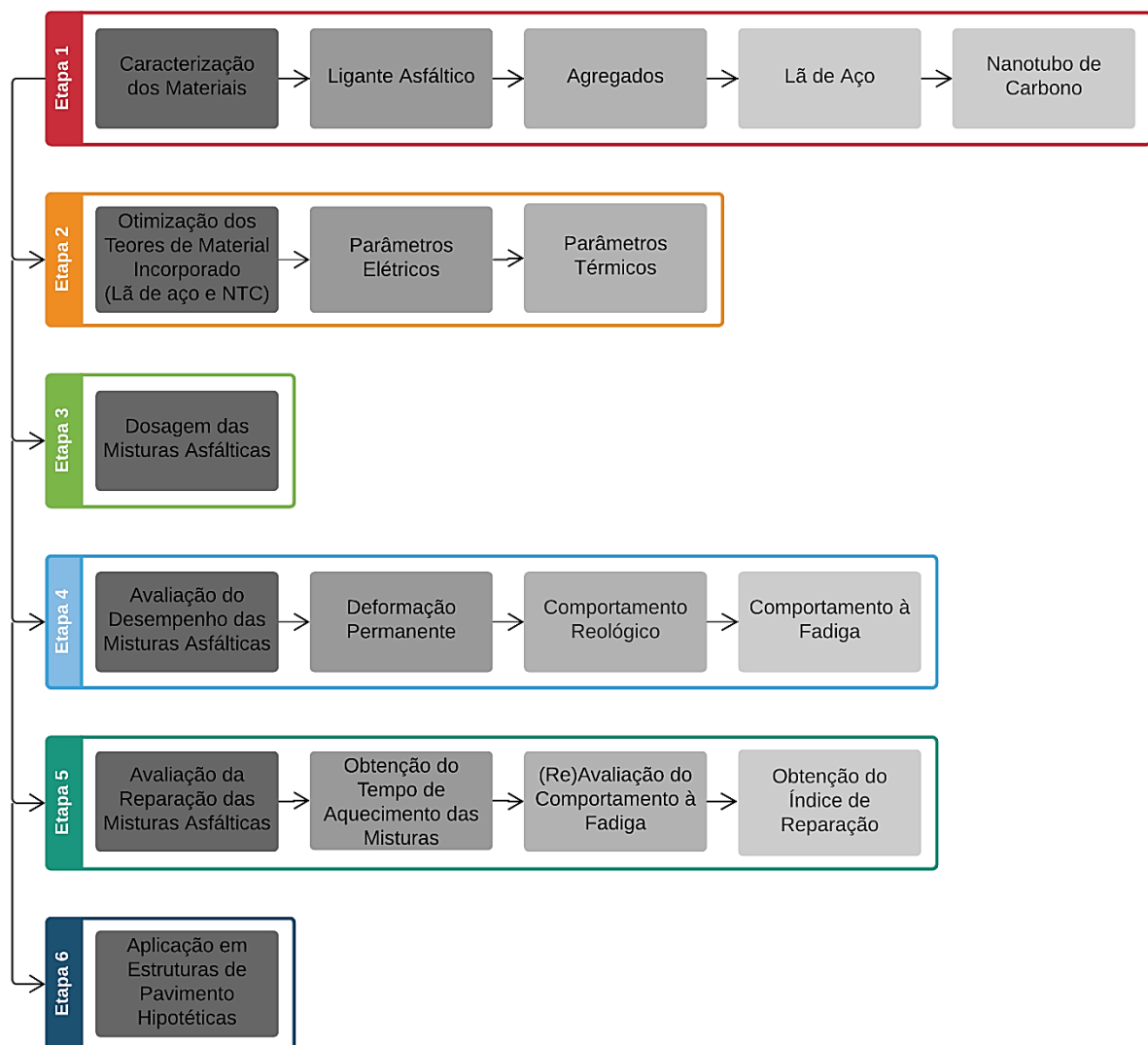
Desta forma, temperaturas próximas ao ponto de amolecimento do ligante asfáltico permitem a redução da viscosidade do ligante asfáltico de forma a contribuir no fenômeno de regeneração ao dano, sem levar a mistura à deformação excessiva devido ao incremento térmico da mesma. Também é verificada maior eficiência no aquecimento das amostras de material asfáltico por meio de micro-ondas em comparativo à utilização de equipamentos termo indutores.

Por fim, a contribuição na construção do conhecimento acerca da capacidade reparadora de materiais asfálticos quando incorporadas fibras metálicas está, sobretudo, na associação desta prática à nanotecnologia, como um mecanismo acelerador do processo regenerativo; neste estudo caracterizada pela incorporação de nanotubos de carbono. Neste trabalho, o NTC conjuntamente à lã de aço potencializará as propriedades de condutividade térmica e elétrica da mistura asfáltica, auxiliando no fenômeno de regeneração.

3 MÉTODO

O plano experimental deste estudo foi composto por seis etapas, que, em sequência, constituíram o método empregado. Para melhor compreensão das atividades envolvidas em cada uma delas, é apresentado o fluxograma da Figura 20.

Figura 20 - Fluxograma geral do plano experimental.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Estas etapas, por sua vez, também foram ramificadas em subetapas ao longo deste trabalho, cujo detalhamento é apresentado nos tópicos a seguir.

3.1 ETAPA 1 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1 Ligante asfáltico de referência

O ligante asfáltico empregado para realização da pesquisa consistiu em um material classificado como CAP 50-70. Esta classe foi priorizada devido à extensiva utilização deste material na prática de pavimentação brasileira (CNT, 2019). O ligante asfáltico é proveniente da refinaria REPAR, localizada na Rodovia do Xisto, km 16 da BR-476, no município de Araucária-PR. As propriedades do material, conforme laudo técnico do fornecedor (REPAR, 2017), são descritas no Quadro 3.

Quadro 3 - Propriedades do ligante asfáltico conforme laudo do fornecedor.

Propriedade CAP 50-70	Limites	Norma ASTM	Resultado
Densidade	-	D 70	1,004
Ponto de amolecimento, mín (°C)	46	D 36	48,2
Penetração – 100 g, 5 s, 25 °C (10 ⁻¹ mm)	50-70	D 5	58
Viscosidade aparente (Brookfield)	-	-	-
a 135 °C, SP 21, 20 rpm, mín (Cp)	274	D 4402	293
a 150 °C, SP 21, 50 rpm, mín (Cp)	112	D 4402	151
a 177 °C, SP 21, 100 rpm (Cp)	57-285	D 4402	59
Viscosidade Saybolt Furol	-	-	-
a 135 °C, mín (s)	141	E 102	152,5
a 150 °C, mín (s)	50	E 102	80,5
a 177 °C, (s)	30-150	E 102	32,3
Índice de susceptibilidade térmica	-1,5 a 0,7	X 018	-1,3
RTFOT	-	-	-
Penetração retida, mín (%)	55	D 5	63
Aumento do ponto de amolecimento, máx (°C)	8	D 36	3,6
Ductilidade a 25 °C, mín (cm)	20	D 113	>100
Varição em porcentagem de massa (%)	-0,5 a 0,5	D 2872	-0,257
Ponto de fulgor, mín (°C)	235	D 92	280
Ductilidade a 25 °C, mín (cm)	60	D 113	>100
Solubilidade no Tricloroetileno, mín (% massa)	99,5	D 2042	99,9
Aquecimento a 177 °C	NESP*	X 215	NESP

*NESP: Não Especificado

Fonte: Empresa fornecedora, (2017).

3.1.2 Agregados

Os agregados utilizados constituíram-se por material britado de origem granítica (granito cinza), fornecidos pela empresa SBM (Sul Brasil Mineração), localizada na cidade Paulo Lopes-SC. Para os ensaios de caracterização dos materiais pétreos que compuseram a mistura, foram empregadas as normativas listadas a seguir:

- a) Adesividade ligante-agregado: DNER-ME 078 – Agregado Graúdo – adesividade a ligante betuminoso;
- b) Angularidade do Agregado Graúdo: *ASTM D 5821 – Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate*;
- c) Angularidade do Agregado Miúdo: *ASTM C 1252 – Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate*;
- d) Dureza: *ASTM C 131 – Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*;
- e) Massa Específica Real do Agregado Miúdo: DNER-ME 084 – Agregado Miúdo: Determinação da Densidade Real;
- f) Massa Específica Real do Material Pulverulento: DNER-ME 085 – Material Finamente Pulverizado: Determinação da Massa Específica Real;
- g) Massa Específica Real, Aparente e Absorção do Agregado Graúdo: *ASTM C 127 – Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*;
- h) Materiais Deletérios: *AASHTO T 112 – Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates*;
- i) Partículas Planas e Alongadas: ABNT NBR 5564 – Lastro ferroviário: Requisitos e métodos de ensaio;
- j) Sanidade: *ASTM C 88 – Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate*;
- k) Teor de Argila: *AASHTO T 176 – Plastic Fines in Graded Aggregates and Soils by Use of the Sand Equivalent Test*.

Salienta-se que, para o ensaio de adesividade ligante-agregado (DNER ME-078), empregou-se como aditivo melhorador de adesividade o produto BETUDOPE fornecido pela empresa Stratura Asfaltos S/A (antiga Ipiranga e BR Distribuidora – Asfaltos S/A). Conforme ficha técnica, o mesmo constitui-se por uma mistura de componentes químicos, diluídos em hidrocarbonetos. Como características físicas, o material apresenta densidade (25 °C) > 1,00, viscosidade máxima (25 °C) de 800

Poise e apresenta como ponto de fulgor temperaturas superiores a 235 °C. Para execução do ensaio, além da amostra de referência (sem aditivo) foram utilizados teores de 0,2%, 0,4% e 0,6% do material, calculado sobre o peso de ligante asfáltico.

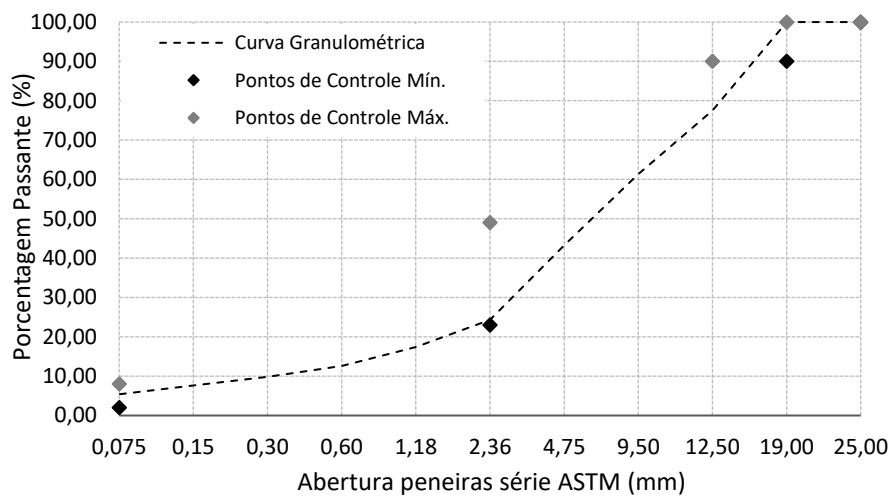
Para elaboração da curva granulométrica característica de projeto, fez-se uso de uma composição granulométrica próxima à desenvolvida pelo CENPES¹/Petrobras para o segmento experimental da BR 101 (trecho entre os quilômetros 409 e 437, em Araranguá/SC) e utilizada por Melo (2014) em sua tese de doutorado. As porcentagens de material passante atendem aos critérios de pontos de controle, para um diâmetro nominal máximo de 19,1 mm, conforme recomendado pela Metodologia Superpave (Asphalt Institute, 2001). A Tabela 6 sintetiza as proporções relativas ao enquadramento nos limites propostos, representados graficamente na Figura 21.

Tabela 6 - Porcentagens de material passante para a série de peneiras ASTM.

Peneiras – Série ASTM	% passante
3/4"	100,00
1/2"	77,5
3/8"	61,3
Nº 4	43,3
Nº 10	24,3
Nº 16	17,4
Nº 30	12,6
Nº 50	9,8
Nº 100	7,6
Nº 200	5,4

Fonte: Melo (2014).

Figura 21 - Composição granulométrica e respectivos pontos de controle.



¹ Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello, CENPES.

A curva apresentada é composta por 43% de brita 3/4", 15,5% de pedrisco e 41,5% de pó de pedra. Relacionando as porcentagens que compõem a curva às suas respectivas peneiras, têm-se 56,7% de agregado graúdo (passante na peneira 3/4" e retido na peneira nº 4), 37,9% de agregado miúdo (passante na peneira nº 4 e retido na peneira nº 200) e 5,4% de material pulverulento (passante na peneira nº 200 e retido no fundo).

3.1.3 Nanotubo de carbono - NTC

As características do NTC, em termos de propriedades físicas e químicas, foram obtidas a partir do fabricante. Fornecido pela empresa *Nanostructured & Amorphous Materials Inc.*, o NTC é composto por um sistema de múltiplas camadas, com diâmetro externo variando entre 50-80 nm e diâmetro interno entre 5-15 nm. Seu comprimento corresponde a cerca de 10-20 μm , com densidade de 2,1 e superfície específica de 60-80 m^2/g . Outra importante característica do NTC apresentada por Fonseca (2011) é sua elevada capacidade de condução térmica, valor da ordem de 3500 W/m.K (supercondutor).

A fração de elementos constituintes, verificada por meio de ensaios de fluorescência de raio x, foi retirada da pesquisa realizada por Melo (2014). Como valores, têm-se: carbono (97,37%), níquel (1,86%), ferro (0,55%), cloro (0,20%) e enxofre (0,02%), indicando o alto grau de pureza (> 95%, conforme laudo) do nanomaterial.

Os aspectos de forma, textura, característica superficial e diâmetro dos nanotubos de carbono foram avaliados por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura de alta resolução (MEV-FEG). A suscetibilidade térmica dos nanotubos de carbono foi avaliada através do ensaio de termogravimetria (*thermogravimetric analysis – TGA*). Tal verificação buscou caracterizar o comportamento dos nanotubos de carbono a elevadas temperaturas, simulando a condição à qual estarão submetidos assim que incorporados ao ligante asfáltico.

A análise térmica foi realizada no Laboratório de Controle de Polimerização (LCP) do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da UFSC,

e consistiu em duas etapas de aquecimento das amostras: (1ª) de 30 °C a 150 °C, seguido por um patamar em temperatura constante de 150 °C durante um intervalo de 30 minutos; (2ª) 150 °C a 800 °C. Como fluido redutor priorizou-se o emprego do Nitrogênio, que, por ser um gás inerte, não exerce influência na avaliação da suscetibilidade térmica dos nanotubos de carbono.

3.1.4 Lã de aço

A lã de aço, obtida no comércio comum pela nomenclatura de “palha de aço”, corresponde ao material produzido pela empresa Worker. Seu processo de fabricação ocorre através da trefilação de arames de aço de baixo carbono, os quais são descamados por um sistema de lâminas de corte (responsáveis pela formação de fios finos, que são posteriormente enrolados, dando a forma característica do material). A lã de aço apresenta densidade de 7,86 e condutividade térmica de aproximadamente 52 W/m.K. Conforme Neres (2011), sua composição química envolve: carbono (entre 0,07% e 0,2%), silício (entre 0,05% e 0,3%), manganês (entre 0,7% e 1,3%), enxofre (entre 0,004% e 0,08%), fósforo (entre 0,0% e 0,1%) e ferro (mínimo 98%).

O produto é comercializado nas classes: palha de aço nº 0 (fina), nº 1 (média) e nº 2 (grossa), de acordo com seus respectivos diâmetros (aproximadamente 70 µm para a fibra nº 0, 100 µm para a nº 1 e 150 µm para a nº 2, informados pelo fabricante). Por apresentar maior diâmetro em relação às demais, a classe de fibra utilizada no decorrer deste estudo corresponde a nº 2 (grossa). Este critério está relacionado a um melhor desempenho na mistura, pela maior resistência à desagregação, menor formação de aglomerados e, principalmente, maior homogeneidade no aquecimento quando submetido a uma fonte indutora de calor (conforme sugerido por Garcia *et al.*, 2014; Gao *et al.*, 2018).

Sendo o material comercializado em rolos de aproximadamente 25 g, fez-se necessário o processo manual de corte das fibras metálicas, seguido pela análise estatística da variação dos comprimentos, buscando enquadrá-las na faixa de comprimento entre 2 mm e 6 mm, na qual tem-se resultados satisfatórios de aquecimento da mistura, conforme apontado por Dai *et al.* (2013), Garcia *et al.* (2014) e Norambuena-Contreras e García, (2016).

Desta forma, uma amostra composta por cinquenta fibras aleatoriamente selecionadas foi avaliada por meio do processamento digital de imagens, visto que a análise por microscopia ótica não atendia as fibras de maior dimensão. Utilizou-se o *software* de código aberto GIMP®, no qual foram transferidas imagens das fibras dispersas, posicionadas sobre uma superfície graduada (papel milimetrado) com escala conhecida. A ferramenta de medição do *software* permitiu cotar as fibras em pixels. Tendo o comprimento de referência da superfície na qual as fibras estavam dispostas (neste caso correspondendo ao papel milimetrado) em milímetros e em pixels, a faixa de comprimento das fibras metálicas foi obtida através da relação matemática entre estes valores.

A caracterização morfológica da lã de aço foi realizada através da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), que permitiu avaliar aspectos de forma, textura, característica superficial e diâmetro do material. A suscetibilidade térmica da lã de aço foi avaliada por meio do ensaio de termogravimetria (*thermogravimetric analysis – TGA*). O protocolo utilizado consistiu em duas etapas de aquecimento: (1ª) de 30 °C a 150 °C, seguido por um patamar em temperatura constante de 150 °C durante um intervalo de 30 minutos; (2ª) 150 °C a 500 °C. Como fluido redutor, pelo mesmo motivo mencionado na análise do NTC, empregou-se Nitrogênio.

3.2 ETAPA 2 – OTIMIZAÇÃO DOS TEORES DE MATERIAL INCORPORADO (LÃ DE AÇO E NTC)

O estudo do teor de incorporação a ser utilizado na mistura asfáltica teve como objetivo otimizar a porcentagem de material incorporado (lã de aço e NTC), de modo a potencializar as características elétricas e térmicas da mistura que influenciariam no processo de reparação (aspectos também estudados por García *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2010; Liu, 2012; García *et al.*, 2014; Norambuena-Contreras e Concha, 2016). Assim, com base nos estudos supracitados foram estabelecidos os ensaios e suas respectivas metodologias, que permitiram definir os teores ótimos de incorporação. Esta metodologia é melhor detalhada a seguir.

Inicialmente, avaliou-se isoladamente o efeito da incorporação das fibras metálicas na definição do teor ótimo, por meio de dois critérios: (1º) alteração nos

parâmetros elétricos do material e (2º) incremento na condutividade térmica das amostras. Em seguida, os mesmos critérios foram empregados para avaliação dos nanotubos de carbono; neste caso, avaliados em conjunto com o teor otimizado de fibra de lã de aço.

Com base nos teores levantados na literatura, foram avaliadas as seguintes porcentagens de fibra de lã de aço: 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 8%, 12%, 16% e 20%. Para o NTC avaliaram-se os teores de 0,25%, 0,50%, 0,75% e 1,00%. Ressalta-se que, para todas as incorporações testadas, as porcentagens foram calculadas sobre peso de ligante asfáltico e as amostras avaliadas em duplicata.

Cabe observar que o nanotubo de carbono foi avaliado em porcentagens inferiores à fibra de lã de aço, pois, conforme mencionado na literatura (Wu *et al.*, 2004), sua atuação é complementar à fibra, de forma a promover o “efeito ponte” entre os caminhos condutivos criados no interior da amostra. Desta forma, inicialmente foram avaliados apenas os teores de fibra de lã de aço, cujo teor ótimo alcançado foi sequencialmente estudado em conjunto com as variações de NTC propostas. Por fim, foi estabelecido o teor de NTC (associadamente ao teor otimizado de fibra de lã de aço) com o qual o efeito condutivo foi potencializado.

Uma vez que os critérios de avaliação requerem amostras de menor dimensão, as diferentes porcentagens de incorporação propostas foram avaliadas em relação a amostras controle (ou seja, sem incorporações) considerando a mistura asfáltica fina (MAF). Para tanto, traçou-se a curva granulométrica do material assumindo-se um diâmetro máximo de 4,75 mm, fracionando-o proporcionalmente à curva original, até a peneira de fundo. As porcentagens de material passante são apresentadas na Tabela 7.

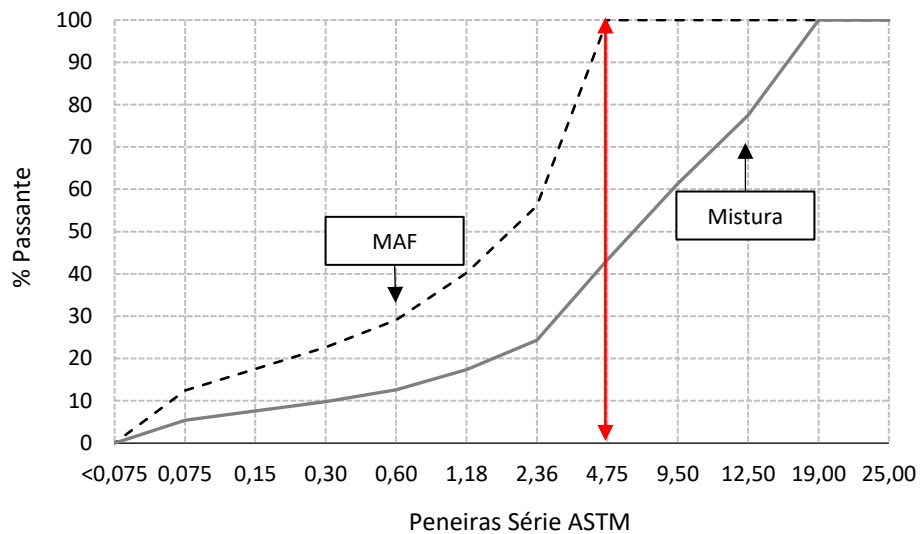
Tabela 7 - Porcentagem de material passante que compõe a curva granulométrica da MAF e respectivas peneiras (Série ASTM).

Peneiras – Série ASTM	% passante
Nº 4	100,00
Nº 10	56,12
Nº 16	40,18
Nº 30	29,10
Nº 50	22,63
Nº 100	17,55
Nº 200	12,47

Fonte: Elaboração própria, (2020).

A Figura 22 apresenta a redistribuição das porcentagens de material passante para composição da MAF, comparando-a a curva original. Em relação ao teor de ligante adicionado, por ser uma etapa prévia a dosagem da mistura, arbitrou-se o valor teórico de 5% pois aproxima-se dos valores comumente observados na prática de pavimentação.

Figura 22 - Distribuição granulométrica adaptada à MAF, em comparação à composição original para a mistura asfáltica, para a série de peneiras ASTM.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Com o intuito de facilitar a moldagem das amostras de MAF, foram confeccionados cilindros metálicos longitudinalmente bipartidos, com altura de 5 cm e diâmetro interno de 3,6 cm (Figura 23). A compactação do material no interior dos moldes foi realizada em diferentes camadas, empregando um soquete metálico maciço de aproximadamente 250 g. O número de golpes aplicados buscou atingir a máxima densificação do material, uma vez que as leituras de resistência elétrica e de condutividade térmica sofrem influência da porosidade das amostras. Ademais, a máxima densificação das amostras buscou atingir o menor volume de vazios possível, retratando as características da MAF no interior da mistura asfáltica.

Figura 23 - Características geométricas dos moldes utilizados para confecção dos corpos de prova de MAF.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Para maior compatibilidade com os equipamentos empregados nas medições de resistência elétrica e condutividade térmica da MAF, foram extraídas do terço médio de cada corpo de prova moldado, 1 amostra com 3,6 cm de diâmetro e altura 1 cm ($\pm 0,2$). A fim de evitar a possível influência da umidade presente nos poros das amostras (1 cm x 3,6 cm) no resultado das leituras, o corte foi realizado utilizando serra sem circulação de água, localizada no Laboratório Polo da UFSC. Para a execução do corte, previamente, os corpos de prova (5 cm x 3,6 cm) foram inseridos em tubos de nylon, visando facilitar a operação de corte e maior precisão na obtenção da altura da amostra (Figura 24).

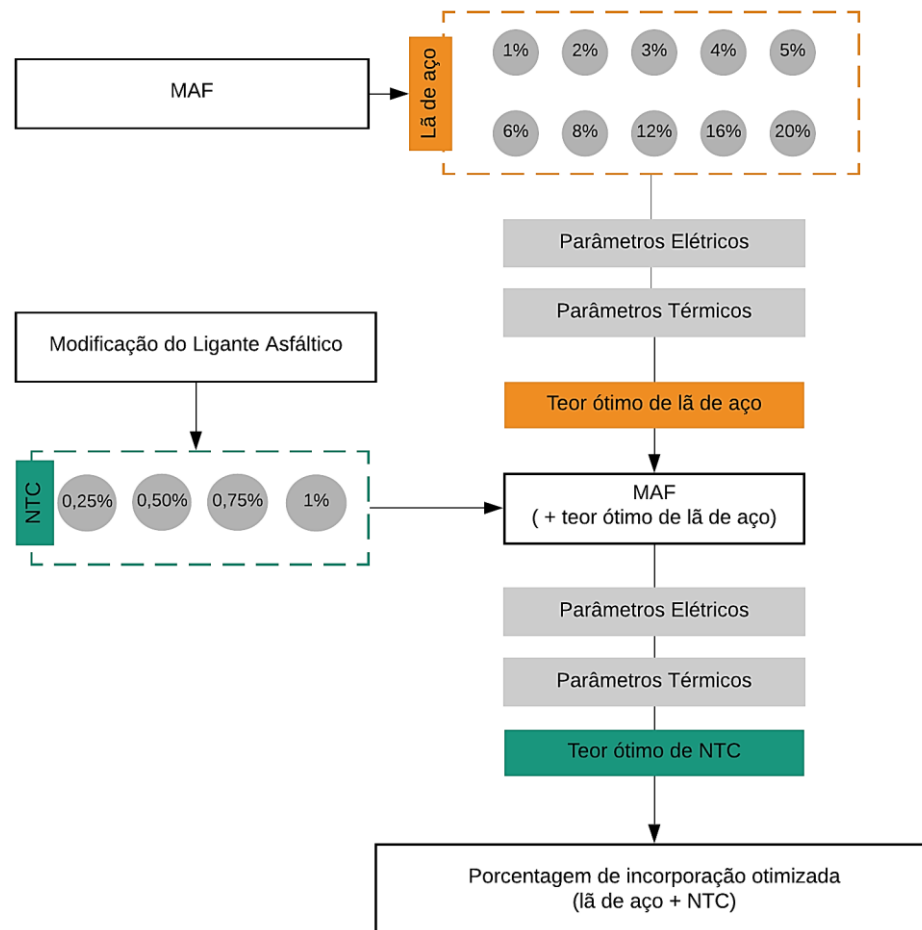
Figura 24 - Amostras extraídas do terço médio dos corpos de prova de MAF e representação do tubo de nylon utilizado para serragem das mesmas.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Assim sendo, o fluxograma da Figura 25 resume o procedimento de composição e moldagem das amostras utilizadas para obtenção do teor ótimo de fibras metálicas e nanotubos de carbono.

Figura 25 - Fluxograma representativo da etapa de otimização das incorporações (lã de aço e NTC) pelos critérios de parâmetros elétricos e térmicos da MAF.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

No estudo de otimização das porcentagens de incorporação propostas, os teores de fibras metálicas foram adicionados à MAF durante a etapa de usinagem, visto que, em estudo inicial, a incorporação das fibras metálicas como modificador do ligante asfáltico resultou na separação de fases entre os materiais.

O protocolo de ensaio em que se verificou a incompatibilidade da modificação do ligante asfáltico pelas fibras metálicas consistiu no aquecimento prévio do ligante

asfáltico até a temperatura de usinagem (obtida através do gráfico temperatura x viscosidade aparente do CAP de referência), neste caso aproximadamente 148 °C. Em seguida, programou-se o misturador de alto cisalhamento (Silverson, modelo L 5 M – A, pertencente ao Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina) com o objetivo de dispersar, durante 30 minutos, sob 2000 rpm, os diferentes teores de fibra estabelecidos.

Com o ligante asfáltico modificado pelo acréscimo de porcentagens de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6% de fibra de lã de aço, foram produzidas amostras de aproximadamente 5 cm de altura e 3,6 cm de diâmetro. Após um período de repouso de 24 horas, verificou-se a separação de fases ocorrida entre os materiais, devido a diferença de densidade entre os materiais (CAP 50-70: 1,004 e aço carbono: 7,86). A Figura 26 ilustra o aspecto das amostras após o período de 24 horas da moldagem.

Figura 26 – Conforme sequência: (1) misturador de alto cisalhamento Silverson L5M-A com controle da temperatura, (2) aspecto da amostra após o processo de modificação, no interior do molde e (3) amostra partida, na qual é possível observar a deposição das fibras metálicas incorporadas.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Assim, obtido o teor ótimo de fibra de lã de aço através da sua incorporação na MAF, procedeu-se a modificação do ligante asfáltico pelos diferentes teores de nanotubo de carbono. O NTC foi incorporado ao ligante asfáltico, sendo dispersado durante 20 minutos à temperatura de 150 °C. Ao final da incorporação, o ligante modificado foi adicionado (em conjunto com o teor ótimo de lã de aço) à MAF para moldagem de novas amostras (5 cm x 3,6 cm) e, por conseguinte, a extração de amostras de 1 cm x 3,6 cm para determinação dos parâmetros elétricos e térmicos.

3.2.1 Parâmetros elétricos

O estudo da influência da incorporação de fibras metálicas e nanotubo de carbono em parâmetros elétricos da MAF foi realizado através da verificação da resistência elétrica pelo método dos dois eletrodos, utilizando corrente contínua (DC). Utilizou-se um multímetro digital da marca HP, modelo 973A. Foram adaptadas placas de alumínio (6 cm x 4 cm) na extremidade das ponteiros de medição do equipamento, posicionadas de maneira a “prensar” a amostra (1 cm x 3,6 cm) entre as duas placas, atuando como eletrodos.

Para realização das medidas, foram gravadas as leituras realizadas pelo equipamento durante um intervalo mínimo de um minuto, no qual eram registrados os valores de resistência elétrica a cada dez segundos. Desta forma, obtiveram-se seis leituras para cada amostra e, em seguida, determinou-se a média destas leituras.

3.2.2 Parâmetros térmicos

O ensaio de condutividade térmica foi realizado nas dependências do Laboratório de Nanotecnologia (Nanotec) da UFSC. Empregou-se o equipamento *Thermal Conductivity Analyzer* (TCi), fabricado pela empresa canadense C-Therm. A base do equipamento, na qual as amostras são apoiadas, contém um sensor modelo MTPS (*Modified Transient Plane Source*) apropriado para avaliação de líquidos, sólidos, materiais particulados e pastas.

Para garantir maior contato entre a amostra e o sensor do equipamento, é recomendada a aplicação de um agente de contato específico para avaliação da condutividade térmica, podendo ser água ou graxa (dependendo do tipo de material a ser ensaiado). Para os corpos de prova da MAF, devido a presença das fibras metálicas, utilizou-se graxa. Também é disposto sobre o conjunto “base do sensor + amostra” um peso metálico, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27 - Equipamento de medição da condutividade térmica das amostras da MAF. A sequência ilustra a disposição da amostra sobre o sensor do equipamento, seguida pela colocação do peso metálico sobre a amostra.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

As medições foram realizadas em sala com temperatura ambiente controlada (23 °C), sendo extraídos os valores relativos as três últimas leituras cuja temperatura tenha variado o mínimo possível. Para realização das leituras de condutividade das amostras de MAF, o equipamento foi previamente calibrado conforme recomendação contida no manual do usuário do equipamento.

3.3 ETAPA 3 – DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

O estudo de dosagem foi realizado nas dependências do Laboratório de Pavimentação Professor Armando Martins Pereira (LAMP), da Universidade Federal do Paraná (UFPR), em conformidade com o procedimento recomendado pela metodologia Superpave. O teor de ligante asfáltico foi inicialmente dosado para as características da mistura de controle e posteriormente para a mistura modificada, esta última contendo os teores otimizados de lã de aço e NTC.

A produção das misturas asfálticas seguiu as especificações contidas na normativa AASHTO R 30 – *Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt*. Para tanto, estabeleceu-se o controle da composição granulométrica através do fracionamento do agregado mineral, visando garantir maior precisão no arranjo granulométrico, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Fracionamento dos agregados que compuseram as misturas asfálticas dosadas.

Fração Passante	Fração Retida
# 3/4"	# 1/2"
# 1/2"	# 3/8"
# 3/8"	# N ^o 4
# N ^o 4	# N ^o 10
# N ^o 10	# N ^o 16
# N ^o 16	# N ^o 30
# N ^o 30	# N ^o 50
# N ^o 50	# N ^o 100
# N ^o 100	# N ^o 200
# N ^o 200	Fundo

Fonte: Elaboração própria, (2020).

A dosagem das misturas asfálticas teve como base a normativa AASHTO M 323 – *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design* e a normativa AASHTO R 35 – *Standard Practice for Superpave Design for Hot-Mix Asphalt (HMA)*. Os corpos de prova moldados através do compactador giratório Superpave (*Superpave Gyrotory Compaction – SGP*) apresentaram diâmetro de 150 mm e altura de 115 mm (± 10 mm), moldados com 125 giros (N_{projeto}), característicos para misturas submetidas a alto volume de tráfego; sendo N_{inicial} de 9 giros e $N_{\text{máximo}}$ equivalente a 205 giros. Tinha-se, ainda, como definição da especificação para a pressão de compactação o valor correspondente a 0,6 MPa, ângulo de compactação $1,25^\circ$ e velocidade de giro de 30 rpm.

O teor ótimo de ligante asfáltico foi obtido partindo de uma proporção de ligante referência de 4%, além dos teores de 3,5%, 4,5% e 5% calculados sobre o peso de agregados minerais total. Cabe observar que, para cada variação no teor de ligante asfáltico incorporado foram moldados três corpos de prova, totalizando 12 corpos de prova por mistura. Com relação às temperaturas, empregou-se o valor no qual as faixas de viscosidade aparente recomendadas de 0,17 Pa.s ($\pm 0,02$ Pa.s) para usinagem e 0,28 Pa.s ($\pm 0,03$ Pa.s) para compactação fossem atendidas, sendo estas temperaturas melhor detalhadas no capítulo de discussão dos resultados.

Ao final da dosagem, os corpos de prova foram verificados quanto aos requisitos Superpave, abrangendo: volume de vazios (V_v), vazios do agregado mineral (VAM), relação betume-vazios (RBV), proporção pó-betume (PPB) e as

porcentagens relativas à massa específica máxima (G_{mm}) ao final do $N_{Inicial}$, do $N_{projeto}$ e do $N_{Máx.}$. A Tabela 9 apresenta os intervalos referentes aos requisitos elencados.

Tabela 9 - Requisitos volumétricos para validação da dosagem Superpave, considerando diâmetro máximo dos agregados de 19,1 mm.

Requisitos da Dosagem Superpave					
Vv (%)	RBV (%)	VAM mín (%)	PPB	% G_{mm}	
4	65 - 75	13	0,8 - 1,6	@* $N_{Inicial}$	≤ 89%
				@ N_{Proj}	96%
				@ $N_{Máx.}$	≤ 98%

*@: número de giros.

Fonte: Asphalt Institute, (2001).

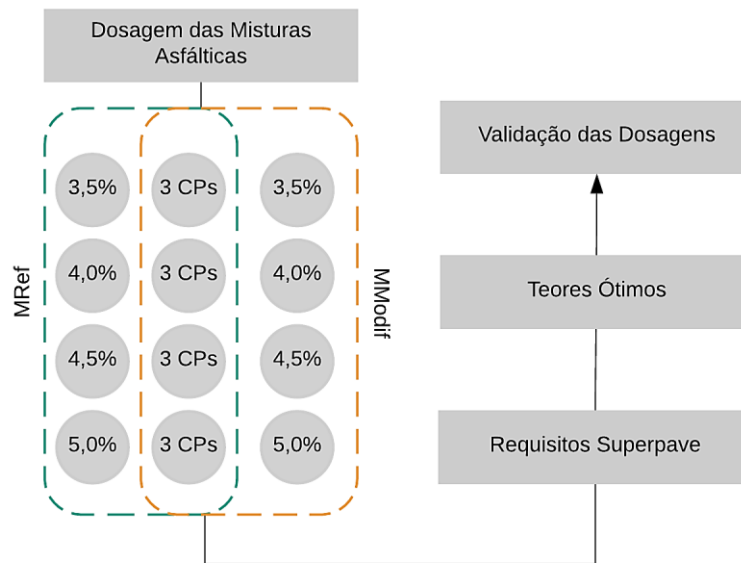
Para determinação da massa específica aparente (G_{mb}) dos corpos de prova, fez-se uso da normativa ASTM D 2726 – *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous*. A massa específica máxima (G_{mm}), por sua vez, foi obtida de acordo com o Método Rice, normatizado pela AASHTO T 209 – *Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity (G_{mm}) and Density of Hot-Mix Asphalt (HMA)*. Em relação à massa específica máxima, cada variação proposta no teor de ligante asfáltico (3,5%, 4%, 4,5% e 5%) foi ensaiada em duplicata, totalizando 8 amostras de mistura asfáltica no estado solto.

Posteriormente ao procedimento de dosagem, foram moldados mais dois corpos de prova correspondentes ao teor ótimo de ligante obtido. Ambos os CPs foram submetidos ao número de giros referente ao $N_{máx}$ (205 giros), a fim de verificar o requisito estabelecido pela metodologia Superpave que recomenda que os corpos de prova moldados mantenham um volume de vazios final superior a 2%, não ultrapassando 98% da G_{mm} .

É importante frisar que ao longo do procedimento de dosagem, para ambas as misturas, foi empregado o aditivo melhorador de adesividade – “dope”. A porcentagem aplicada correspondeu a 0,40% sobre o peso de ligante asfáltico (valor melhor detalhando na discussão de resultados), uma vez que a natureza mineralógica do agregado mineral não apresentou condição de adesividade satisfatória, verificada através do ensaio DNER-ME/078.

O fluxograma apresentado na Figura 28 tem por objetivo sintetizar a dosagem realizada para ambas as misturas: referência e modificada. Complementarmente, são apresentadas as etapas utilizadas para posterior validação dos resultados e o número de amostras relativo a cada estágio.

Figura 28 - Fluxograma representativo das etapas e validação do procedimento de dosagem para a mistura de referência e modificada.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

A Figura 29 ilustra parte do procedimento empregado para a confecção da mistura modificada, sendo este composto pela sequência de fotos: (1) composição prévia da mistura de agregados pétreos nas frações correspondentes as peneiras utilizadas; (2) separação e pesagem da fibra metálica a ser incorporada em cada corpo de prova; (3) pesagem e adição ao CAP do aditivo melhorador de adesividade; (4) colocação dos materiais na cuba do misturador, obedecendo a ordem: ligante, agregados e fibras; (5) remoção da mistura após dois ciclos de homogeneização (60 segundos cada); (6) aspecto dos corpos de prova desmoldados (CPs do lado direito correspondem à mistura modificada, CPs do lado esquerdo são relativos à mistura de referência).

Figura 29 - Sequência das etapas executadas para confecção dos corpos de prova referentes à dosagem da mistura modificada e comparativo entre CPs dosados (última foto).



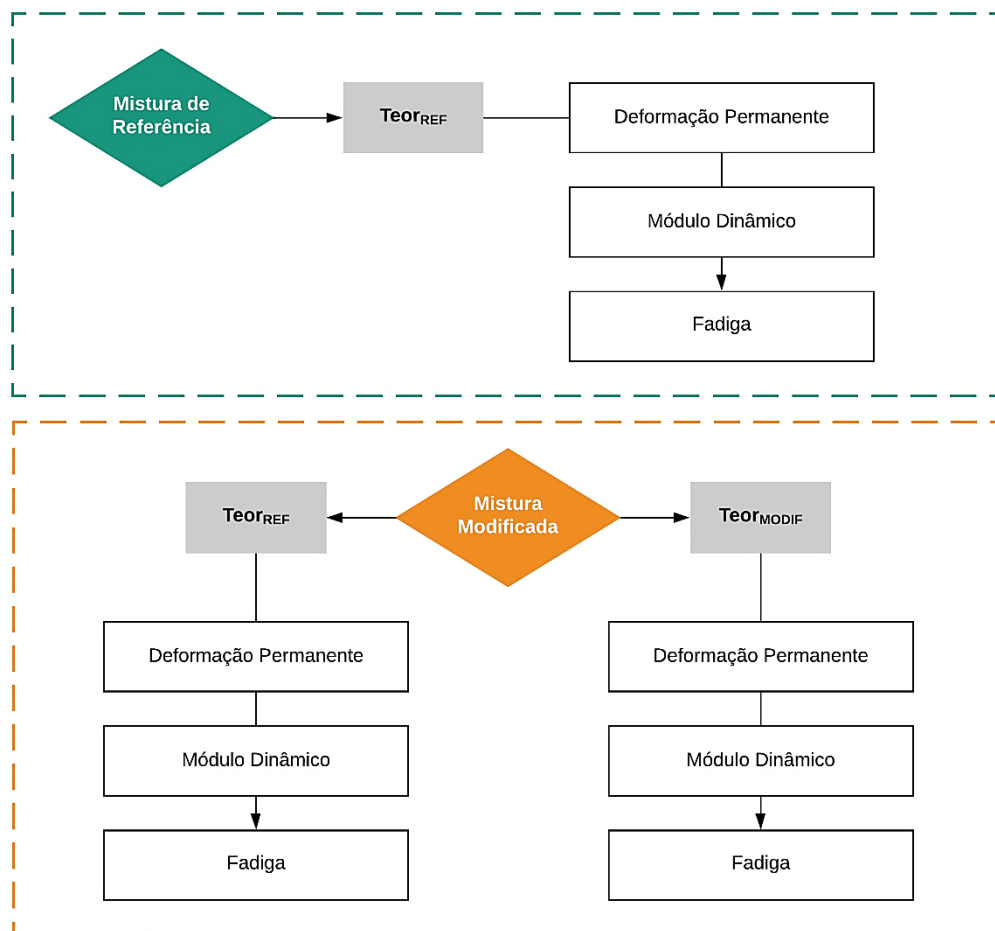
Fonte: Elaboração própria, (2020).

Cabe destacar que, entre a quinta e sexta etapa, houve a simulação do envelhecimento da mistura a curto prazo, por meio do seu condicionamento na estufa, durante um intervalo de duas horas na temperatura de compactação. Sequencialmente, os corpos de prova foram compactados no compactador giratório Superpave (modelo IPC Global - Servopac).

3.4 ETAPA 4 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Após a dosagem, procedeu-se a avaliação do desempenho mecânico e reológico de ambas as misturas. A sequência das etapas que compuseram a avaliação supracitada pode ser observada na Figura 30.

Figura 30 - Fluxograma representativo das etapas de avaliação do desempenho da mistura de referência e da mistura modificada.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Para a mistura de referência (M_{Ref}), a sequência de ensaios após a obtenção do teor ótimo de ligante asfáltico consistiu em: deformação permanente, comportamento reológico e comportamento à fadiga. Para a mistura modificada, seguiu-se a mesma ordem de ensaios. Entretanto, a avaliação considerou a mistura

modificada sendo usinada com seu respectivo teor ótimo – $M_{Modif}(T_{Modif})$ e, paralelamente, com o teor ótimo relativo à mistura de referência – $M_{Modif}(T_{Ref})$.

A variação nos teores de ligante asfáltico para a mistura modificada – $M_{Modif}(T_{Ref})$ e $M_{Modif}(T_{Modif})$ teve como objetivo avaliar dois aspectos acerca da incorporação das fibras metálicas. O primeiro corresponde ao desempenho da fibra quando utilizada como um aditivo final à mistura de referência. Ou seja, quando incorporada à mistura sem necessitar alterações em seu processo de dosagem. Enquanto o segundo aspecto visou analisar a incorporação das fibras metálicas durante a dosagem da mistura asfáltica e, conseqüentemente, seu efeito nas características volumétricas e de desempenho.

Assim, foram produzidas placas de concreto asfáltico moldadas utilizando uma mesa compactadora LCPC (*Laboratoire central des ponts et chaussées*), atual IFSTTAR (*Institut français des sciences et Technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux*), seguindo os critérios preconizados na normativa francesa AFNOR NF P 98-250-2 – *Essais Relatifs Aux Chaussées, Préparation des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 2: Compactage des Plaques*.

Para as placas utilizadas no ensaio de deformação permanente, foi empregada a compactação forte “*tipo 2*”, confeccionando 2 placas de dimensão 50 x 18 x 5 cm para cada tipo de mistura avaliada M_{Ref} , $M_{Modif}(T_{Ref})$, $M_{Modif}(T_{Modif})$, totalizando 6 placas.

Quanto ao ensaio de módulo dinâmico e fadiga, foram moldadas 3 placas de concreto asfáltico nas dimensões 60 x 40 x 9 cm para cada uma das misturas, na compactação forte “*tipo 2 bis*”, características para rodovias de tráfego pesado. Para ambas as moldagens, o peso de mistura compactado correspondeu àquele no qual as dimensões necessárias às placas foram atingidas, considerando o volume de vazios da mistura equivalente a 4%, calculado a partir da G_{mb} corrigida (obtida na dosagem).

3.4.1 Desempenho à deformação permanente da mistura asfáltica

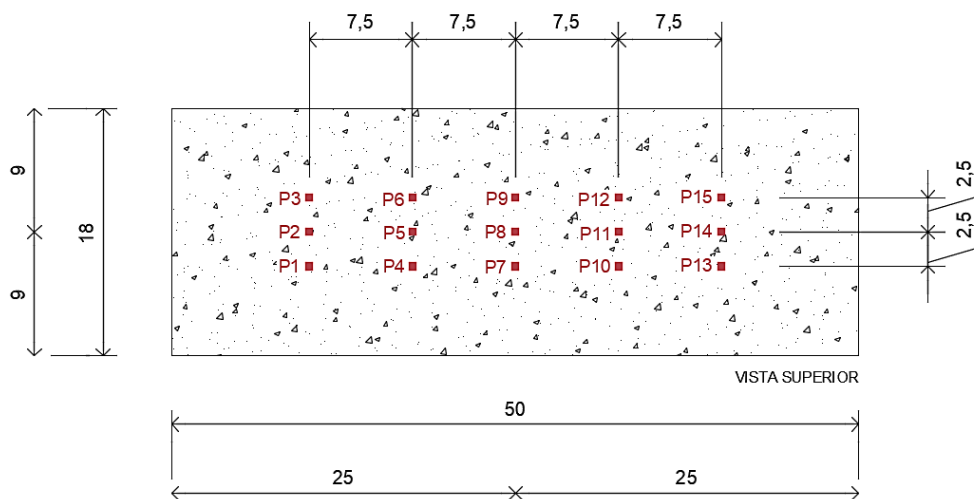
A avaliação do comportamento das misturas asfálticas convencional e modificada, quanto à formação de trilha de roda, foi realizada pelo equipamento francês *Orniéreur*. Para tanto, foram seguidos os procedimentos recomendados pela

normativa AFNOR NF P 98-253-1 – *Essais relatifs Aux Chaussées, Deformation Permanente des Mélanges Hydrocarbonés.*

O ensaio consistiu na passagem de um eixo simples, com pressão de insuflagem dos pneus de 0,6 MPa, sobre as placas de concreto asfáltico em ciclos com frequência de 1 Hz. O carregamento aplicado equivale a 5 kN, sendo aplicado sempre sobre a mesma trilha de roda. Previamente ao início do ensaio, as placas de concreto asfáltico foram submetidas a dois condicionamentos: primeiramente foram realizados 1.000 ciclos, sob temperatura de 15 °C a 25 °C, com o objetivo de acomodar a placa junto ao molde de ensaio; em seguida, procedeu-se o condicionamento das placas até a obtenção de uma temperatura de 60 °C.

Anteriormente ao início do carregamento, foram feitas leituras em pontos pré-definidos da superfície da placa (em relação a um plano de referência). Este procedimento serviu como parâmetro para verificação do desenvolvimento das trilhas de roda. Ao longo do procedimento de ensaio, foram realizadas medidas nos ciclos: 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000. A distribuição dos pontos de controle na superfície da placa é representada na Figura 31.

Figura 31 - Distribuição dos pontos de controle das medidas de afundamento na superfície da placa (espaçamento em centímetros).



Fonte: Adaptado de AFNOR NF P 98-253-1 (1998).

O cálculo da profundidade da deformação permanente para cada ciclo de interesse, considerando a média dos quinze pontos estabelecidos na superfície da

placa de concreto asfáltico, foi realizado utilizando a Equação 12 apresentada a seguir.

$$P_i (\%) = 100 * \frac{\sum_j (m_{ij} - m_{0j})}{15 * ES} \quad (12)$$

Onde:

P_i : porcentagem média de afundamento na superfície da placa no ciclo i ;

j : ponto no qual é realizada a leitura da deformação permanente (P_1 a P_{15} , conforme a Figura 31);

m_{ij} : medida da profundidade no ponto j , no ciclo i ;

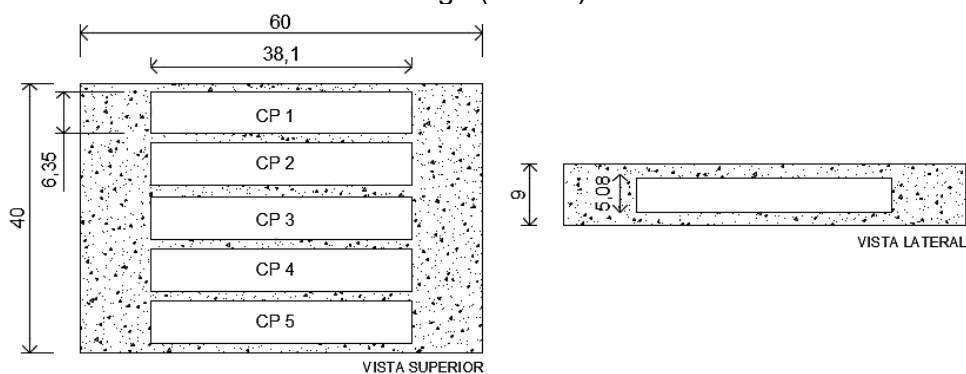
m_{0j} : medida da profundidade no ponto j , no ciclo 0; e,

ES : espessura da placa.

3.4.2 Comportamento reológico e desempenho à fadiga da mistura asfáltica

Após a moldagem das placas de concreto asfáltico nas dimensões previamente especificadas (60 x 40 x 9 cm), procedeu-se a extração dos corpos de prova prismáticos (vigotas) com o auxílio de uma serra circular. De cada placa foram obtidos 5 CPs, totalizando 15 vigotas por mistura, as quais foram empregadas nos ensaios de módulo dinâmico, fadiga e reparação. A dimensão final dos corpos de prova correspondeu a aproximadamente 5,08 x 6,35 x 38,1 cm, conforme detalhado no croqui da Figura 32.

Figura 32 - Esquema de obtenção dos corpos de prova para ensaio de módulo dinâmico e fadiga (em cm).



Fonte: Adaptado de Melo, (2014).

A determinação do módulo dinâmico e da vida de fadiga, tanto para mistura controle quanto para a mistura modificada, seguiu as especificações (Quadro 4) das normativas *EN 12697 – Bituminous Mixtures, Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 26: Stiffness* e *EN 12697 – Bituminous Mixtures, Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 24: Resistance to Fatigue*, respectivamente. Ambos os ensaios foram realizados utilizando o equipamento “*Pneumatic 4 Point Bending Apparatus*”, fabricado pela empresa IPC Global®.

Quadro 4 - Resumo das condições de ensaio de módulo dinâmico e resistência à fadiga.

Módulo dinâmico	
Parâmetro	Condição de Ensaio
Tipo de carregamento	Sinusoidal contínuo
Deformação	Controlada (50 $\mu\text{m}/\text{m}$)
Varredura de temperaturas	0 °C, 5 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C e 30 °C
Varredura de frequências	0,1 Hz, 0,2 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 5Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz
Fadiga	
Parâmetro	Condição de Ensaio
Deformação	Controlada
Critério de ruptura	50% do valor de $ E^* $ inicial (lido no 100º ciclo)
Temperatura de ensaio	20 °C
Frequência de ensaio	10 Hz (equivalente a velocidade de 72 km/h)
Níveis de deformação pretendidos	130 $\mu\text{m}/\text{m}$, 165 $\mu\text{m}/\text{m}$, 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ e 235 $\mu\text{m}/\text{m}$

Fonte: Elaboração própria, (2020).

Em termos de caracterização reológica, os ensaios foram realizados sob deformação controlada de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$, a fim de evitar a indução de dano ao material. Verificou-se a rigidez da mistura asfáltica através de uma varredura de frequência e temperatura (apresentadas no Quadro 4). A partir dos ensaios de caracterização reológica do material asfáltico, foi possível obter as curvas de caracterização do módulo dinâmico, sendo elas: curvas isócronas, curvas isotérmicas, espaço de Black e plano Cole-Cole.

A partir da construção do plano Cole-Cole e de sua representação em termos de componentes reais e imaginárias, foram obtidos os parâmetros reológicos do modelo de Huet-Sayegh, o qual representa o comportamento das misturas asfálticas para qualquer temperatura e frequência de carregamento. Modelo que será utilizado na simulação numérica de estruturas de pavimento na Etapa 6 desta pesquisa. Matematicamente, o modelo de Huet-Sayegh é expresso pelas Equações 13 a 18.

$$|E * (i\omega\tau(\theta))| = E_0 \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} + (i\omega\tau(\theta))^{-h}} \quad (13)$$

$$E1 = E_0 \frac{D1}{D1^2 + D2^2} \quad (14)$$

$$E2 = \frac{D2}{D1^2 + D2^2} \quad (15)$$

$$D1 = \frac{1 + \delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} \cos(k\frac{\pi}{2}) + (i\omega\tau(\theta))^{-h} \cos(h\frac{\pi}{2})}{E_\infty - E_0} \quad (16)$$

$$D2 = \frac{\delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} \sin(k\frac{\pi}{2}) + (i\omega\tau(\theta))^{-h} \sin(h\frac{\pi}{2})}{E_\infty - E_0} \quad (17)$$

$$\tau(\theta) = e^{(A_0 + A_1\theta + A_2\theta^2)} \quad (18)$$

Onde:

E1: componente real (armazenamento ou elástica);

E2: componente imaginária (perda ou viscosa);

E_∞ : módulo dinâmico infinito (quando $\omega\tau \rightarrow \infty$, para elevadas frequências e baixas temperaturas);

E_0 : módulo estático;

i : número complexo definido por $i^2 = -1$;

τ : tempo de relaxação dos amortecedores, que se assemelha a um tempo de retardo, e varia em função da temperatura (θ);

ω : frequência angular da solitação $\omega = 2\pi f$;

f : frequência de carregamento;

k, h : parâmetros dos elementos parabólicos, os quais estão inseridos no intervalo $0 < k < h < 1$;

δ : constante adimensional, função da natureza do ligante asfáltico e da granulometria da mistura asfáltica; e

A_0, A_1, A_2 : parâmetros escalares.

3.5 ETAPA 5 – AVALIAÇÃO DA REPARAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Conforme abordado no referencial teórico, a característica de regeneração ao dano das misturas asfálticas pode ser potencializada a partir da indução de temperatura (através de uma fonte externa) e da inserção de períodos de repouso entre carregamentos (LIU *et al.*, 2011; DAI *et al.*, 2013; GARCIA *et al.* 2014; XIAO, 2017). Desta forma, com o objetivo de acelerar esta propriedade em ambas as misturas estudadas (referência e modificada), estabeleceu-se um protocolo de reparação, que englobou o aquecimento das amostras e a inserção de períodos de repouso entre os ensaios de fadiga descritos na etapa anterior.

No aquecimento dos corpos de prova de concreto asfáltico de ambas as misturas foi utilizado como dispositivo indutor um forno de micro-ondas (marca Midea, modelo MTRS42, com capacidade de 31 litros, potência de micro-ondas de 900 W). Para esta abordagem, fez-se uso dos mesmos corpos de prova empregados na avaliação do comportamento à fadiga, uma vez que ambas as etapas são complementares. Este procedimento era conduzido ao final do primeiro ensaio de fadiga, em sequência, para o mesmo corpo de prova, evitando a influência de períodos de repouso não previstos no protocolo de avaliação da capacidade de recuperação das misturas.

Assim, atingido o critério de paralização do ensaio de fadiga (50% do valor do módulo dinâmico inicial), executavam-se os seguintes passos para todos os corpos de prova:

- a) Remoção do corpo de prova do berço do aparato quatro pontos;
- b) Colocação imediata do corpo de prova no interior do forno micro-ondas;
- c) Programação do tempo de aquecimento (86”);
- d) Aquecimento do corpo de prova durante o intervalo estabelecido, sempre apoiado sobre uma base plana e rígida (visando evitar deformações);

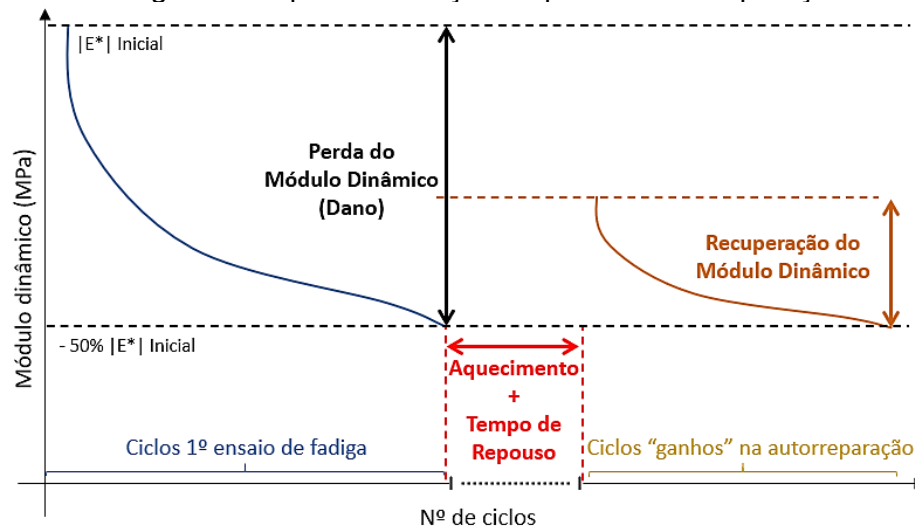
- e) Remoção do corpo de prova do interior do forno micro-ondas;
- f) Colocação imediata do mesmo na câmara climatizada (20 °C), mantendo-o apoiado sobre uma base plana e rígida;
- g) Acondicionamento a 20 °C, durante o período de repouso de 3 horas;
- h) Após 2 horas e 45 minutos de acondicionamento, transferência do corpo de prova da base rígida para o berço do equipamento quatro pontos;
- i) Finalizadas às 3 horas do período de repouso, tem início o segundo ensaio de fadiga (até atingir 50% do valor de módulo dinâmico inicial lido no centésimo ciclo do primeiro ensaio – Etapa 4 –, ou seja, do ensaio sem reparação).

Cabe destacar que a definição do período de repouso de 3 horas teve como base as pesquisas realizadas por Liu *et al.* (2010, 2012, 2017) e Dihn *et al.* (2018), nas quais o intervalo de repouso entre carregamento das amostras mostrou-se suficiente para o processo de reparação. Além de permitir com que a regeneração do material asfáltico ocorra eficientemente, o tempo de repouso de 3 horas também é suficiente para o resfriamento da amostra, permitindo ensaiá-la novamente à fadiga no segundo ciclo de ensaio (na temperatura de 20 °C).

De acordo com Liu (2012), para as condições avaliadas em seu estudo, a amostra de concreto asfáltico resfria cerca de 40 °C nos primeiros 30 minutos de repouso (devido ao gradiente térmico formado entre a face superior e inferior da amostra, que, quando cessado o aquecimento, tende a entrar em equilíbrio). À medida em que o gradiente térmico reduz, também ocorre a redução na taxa de resfriamento da amostra. Após o intervalo de 1 hora de repouso, o resfriamento da amostra ocorre de maneira gradual. Por fim, em 3 horas de repouso, a amostra apresenta temperatura apenas 1,9 °C superior à sua temperatura original (previamente ao aquecimento).

Com base nos resultados alcançados nas pesquisas supracitadas, foi estabelecido como tempo de repouso para a presente pesquisa o intervalo de 3 horas. A Figura 33 ilustra, a título de exemplo, o comportamento esperado para as misturas asfálticas, em termos de recuperação do módulo dinâmico e aumento dos ciclos de carregamento, após a execução do protocolo acima descrito.

Figura 33 - Recuperação do módulo dinâmico e acréscimo no número de ciclos de carregamento após a execução do protocolo de reparação.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Conforme observado no protocolo apresentado, a etapa de aquecimento das amostras no micro-ondas configura uma parcela fundamental na análise. Desta forma, o subtítulo a seguir busca ampliar o detalhamento da obtenção da temperatura ótima de aquecimento dos corpos de prova.

3.5.1 Obtenção do tempo de aquecimento no micro-ondas

Conforme observado no protocolo acima, ao atingir o critério de paralização do primeiro ensaio de fadiga, os corpos de prova foram aquecidos e submetidos a um período de repouso de 3 horas para que se pudesse dar prosseguimento à avaliação da reparação. Desta forma, fez-se necessário estabelecer o tempo pelo qual as amostras seriam aquecidas no interior do forno de micro-ondas, visando atingir uma temperatura interna máxima de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (próximo a valores recomendados por Garcia *et al.* (2014a, 2014b), Menozzi *et al.* (2015)).

A definição da temperatura interna máxima "alvo" de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ para a mistura de referência obedece a dois aspectos abordados na literatura e que influenciam a reparação das amostras de concreto asfáltico, são eles: (1º) a temperatura mínima de aquecimento para que o ligante asfáltico sofra alterações na sua viscosidade e seja capaz de fluir (valor que correspondeu a uma temperatura próxima a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, para os

ligantes asfálticos utilizados nas pesquisas de Garcia *et al.* 2014b e Menozzi *et al.* 2015), sendo, nesta pesquisa, relacionado a uma temperatura aproximadamente 10 °C acima do ponto de amolecimento do ligante de referência e (2º) a temperatura máxima de aquecimento para que, considerando o maior potencial de aquecimento da mistura modificada, não ocorressem deformações ou alterações de forma nas amostras desta mistura (identificadas visualmente através de deformações na superfície da amostra e/ou pelo seu abaulamento).

Em relação à temperatura máxima de aquecimento, conforme retratado na literatura por Garcia *et al.* (2014a, 2014b) e Menozzi *et al.* (2015) – temperaturas muito elevadas tendem a ocasionar a desagregação dos corpos de prova e resultar em baixos índices de reparação. Desta forma, assumiu-se como limite máximo de aquecimento interno das amostras a temperatura de 110 °C, conforme estudo realizado por Pamulapati *et al.* (2017).

Com o objetivo de obter o “tempo ótimo de aquecimento”, foram avaliados corpos de prova (5,08 x 6,35 x 38,1 cm) em duplicata, extraídos das placas (60 x 40 x 9 cm) moldadas para a mistura asfáltica de referência e para a modificada. Além do tempo de micro-ondas, foi também obtida a taxa de aquecimento interna das misturas (referência e modificada, esta última com os teores otimizados de incorporação de lâ de aço e NTC), a fim de permitir estimar tempos de aquecimento para obtenção de diferentes temperaturas.

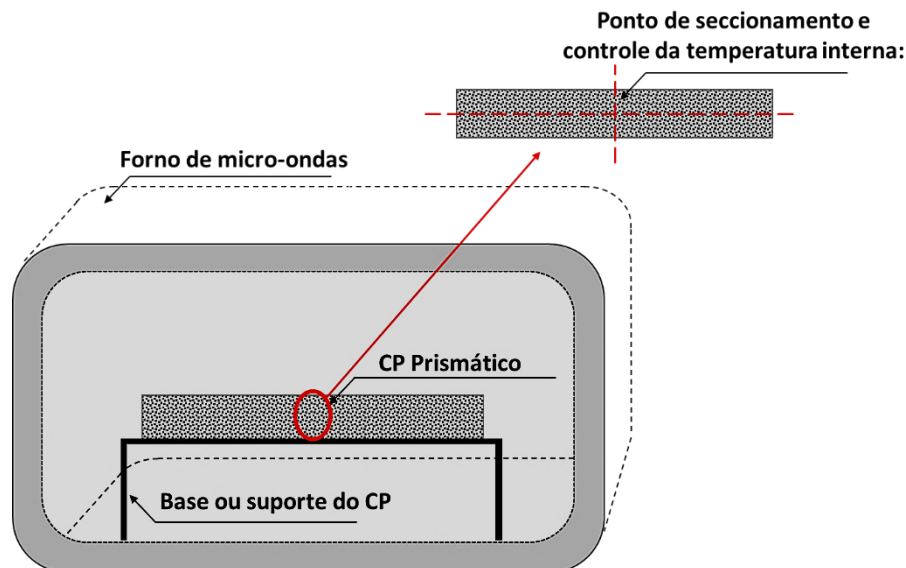
A obtenção das temperaturas foi realizada com uma câmera termográfica de infravermelho, modelo B400 da marca Flir®. Foram aquecidos corpos de prova (em duplicata) relativos a cada mistura estudada nos tempos de 30, 60 e 90 segundos. Ao fim de cada intervalo de aquecimento, a amostra era retirada do equipamento, sendo imediatamente fracionada ao meio e, sequencialmente, obtida sua temperatura máxima interna. Ao final deste processo, o período de aquecimento adotado como “tempo de micro-ondas” correspondeu àquele no qual a amostra de referência atingiu temperatura interna máxima de 60 °C (obedecendo aos critérios supracitados).

Cabe ressaltar que o objetivo de fracionar a amostra ao meio e controlar sua temperatura máxima interna deve-se ao fato de que, durante o ensaio de fadiga, o carregamento imposto resulta em maiores deformações de tração no terço médio da amostra de concreto asfáltico, tornando esta região mais suscetível à ocorrência e propagação de microfissuras. Também deve-se considerar que é nesta região onde

se procura atingir o maior nível de reparação. Como o aquecimento da amostra é requisito para que a reparação seja potencializada, a região de controle da temperatura deve coincidir com aquela onde se espera que a amostra atinja a maior reparação.

Além disso, de forma a prevenir deformações na amostra, em função das alterações na consistência do material asfáltico, durante todo o processo de aquecimento esta era posicionada sobre uma base plana e rígida, confeccionada em gesso. Um esquema representativo do aquecimento do corpo de prova no interior do forno micro-ondas é apresentado na Figura 34.

Figura 34 - Esquema representativo do ponto aproximado de controle da temperatura do corpo de prova no interior do forno micro-ondas.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Ressalva-se que, previamente a avaliação da taxa de aquecimento das misturas estudadas, as amostras utilizadas foram condicionadas durante 24 horas a temperatura de 20 °C no interior de uma câmara climatizada. Esta ponderação teve como objetivo avaliar o aquecimento interno das amostras de maneira mais próxima possível ao protocolo de fadiga e reparação, uma vez que as amostras – terminado o primeiro ciclo de fadiga – estão condicionadas à temperatura de ensaio (20 °C) antes de serem levadas ao micro-ondas para indução da temperatura, correspondendo a temperatura no “tempo zero”.

3.5.2 Obtenção do índice de reparação

A capacidade regenerativa das misturas estudadas pôde ser obtida através da verificação da recuperação do módulo dinâmico e do número de ciclos “ganhos” para cada amostra, após submetê-las ao aquecimento por micro-ondas e à aplicação do tempo de repouso. Cada amostra teve seu índice de reparação calculado (Equação 19), adaptando as equações propostas por Xiao *et al.* (2017).

$$I_{AR} = \frac{(n^{\circ} \text{ de ciclos})_{reparado}}{(n^{\circ} \text{ de ciclos})_{original}} \quad (19)$$

Onde:

I_{AR} : índice de reparação;

$n^{\circ} \text{ de ciclos}_{original}$: número de ciclos obtido para a mistura, até atingir 50% do valor de módulo dinâmico inicial;

$n^{\circ} \text{ de ciclos}_{reparado}$: número de ciclos obtido para a mistura após o procedimento de reparação, até atingir o critério de parada.

A Equação 20 aborda o mesmo critério de avaliação, porém expresso em porcentagem:

$$\%_{AR} = \frac{(n^{\circ} \text{ de ciclos})_{reparado}}{(n^{\circ} \text{ de ciclos})_{original}} * 100 \quad (20)$$

Além do Índice de reparação em termos de vida de fadiga, obteve-se o Índice de Recuperação do módulo dinâmico das misturas de referência e modificada. Sua obtenção se deu de maneira semelhante à Equação 19, conforme pode ser observado na Equação 21.

$$I_{MD} = \frac{(|E * |Inicial)_{reparado}}{(|E * |Inicial)_{original}} \quad (21)$$

Onde:

I_{MD} : Índice de recuperação do módulo dinâmico;

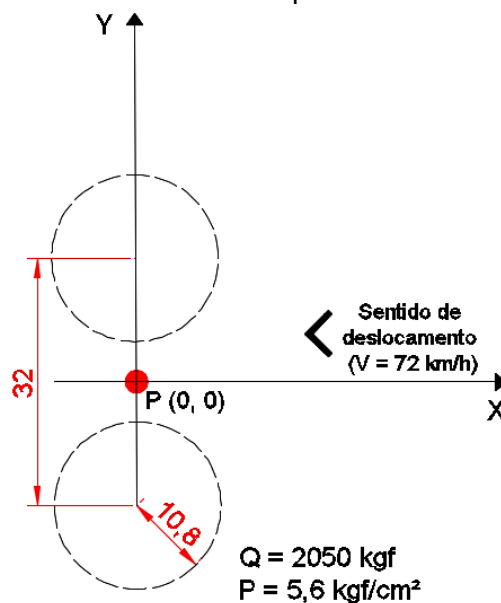
$|E^*|_{Inicial\ original}$: módulo dinâmico obtido no centésimo ciclo, referente ao ensaio sem reparação;

$|E^*|_{Inicial\ reparado}$: módulo dinâmico obtido no centésimo ciclo do segundo ensaio de fadiga, referente ao ensaio após a reparação.

3.6 ETAPA 6 – APLICAÇÃO EM ESTRUTURAS DE PAVIMENTO HIPOTÉTICAS

Na sexta etapa do plano experimental, os dados laboratoriais obtidos foram utilizados para simulação computacional de duas estruturas de pavimento hipotéticas. A análise teve como objetivo verificar o desempenho de ambas as misturas estudadas: referência e modificada (esta última com o teor ótimo de lã de aço + teor ótimo de NTC), considerando a atuação do eixo padrão rodoviário de 8,2 tf. Como configurações de carregamento tinha-se: 2050 kgf por roda, velocidade de 72 km/h (equivalente à frequência de 10 Hz, para as condições de carregamento e estrutura propostas por Chabot *et al.* (2006) em seu estudo) e pressão de insuflagem dos pneus de 5,6 kgf/cm², com área de contato circular. A configuração do carregamento é apresentada na Figura 35.

Figura 35 - Representação esquemática da configuração de carregamento do semieixo de roda dupla.



Fonte: Adaptado de Melo, (2014).

Neste sentido, foram avaliadas duas estruturas de pavimento, localizadas em rodovias distintas, com o objetivo de comparar o desempenho das misturas asfálticas estudadas aplicadas em camadas de rolamento com espessuras distintas (uma delas delgada e a outra robusta). Cabe ressaltar que a temperatura do revestimento asfáltico considerada nas simulações (para ambas as estruturas) correspondeu àquela em que os ensaios de fadiga foram realizados (20 °C).

A primeira rodovia estudada corresponde à BR 101, trecho localizado entre os km 411,5 e 412,5 (latitude: 28°55'45,92" e longitude: 49°30'43,44") no município de Araranguá/SC. O volume de tráfego estimado para o trecho em questão corresponde a $1,64 \times 10^8$ (USACE), conforme apresentado por Melo (2014). Em um segundo momento, procedeu-se a avaliação para o trecho da rodovia SC 370 localizado no município de Urubici/SC (latitude: 27°59'38,35" e longitude: 49°34'12,80"), entre os km 77,3 e 77,6. O volume de tráfego previsto para este trecho corresponde a $2,42 \times 10^6$ (USACE), de acordo com Pérez (2016).

Optou-se por aplicar a avaliação nestes segmentos, uma vez que os mesmos foram contemplados nos estudos de monitoramento desenvolvidos pela Universidade Federal de Santa Catarina e inseridos no programa da Rede Temática de Tecnologia do Asfalto. Desta forma, para a avaliação proposta no presente trabalho fez-se uso das estruturas de pavimento localizadas nos trechos supracitados, compostas pelas camadas detalhadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Camadas, materiais e espessuras que compõe as estruturas do pavimento dos trechos estudados para a BR 101 (Araranguá/SC) e para a SC 360 (Urubici/SC).

Camada do Pavimento	BR 101 – Araranguá/SC		SC 360 – Urubici/SC	
	Material	Espessura (cm)	Material	Espessura (cm)
Revestimento	CBUQ	15,00	CBUQ	6,00
Base	BGS ¹	18,00	BGS ¹	15,00
Sub-base	Macadame Seco	20,00	Macadame Seco	20,00
Terraplenagem	Solo Páleo Duna	infinito	Solo (CBR >5%)	infinito

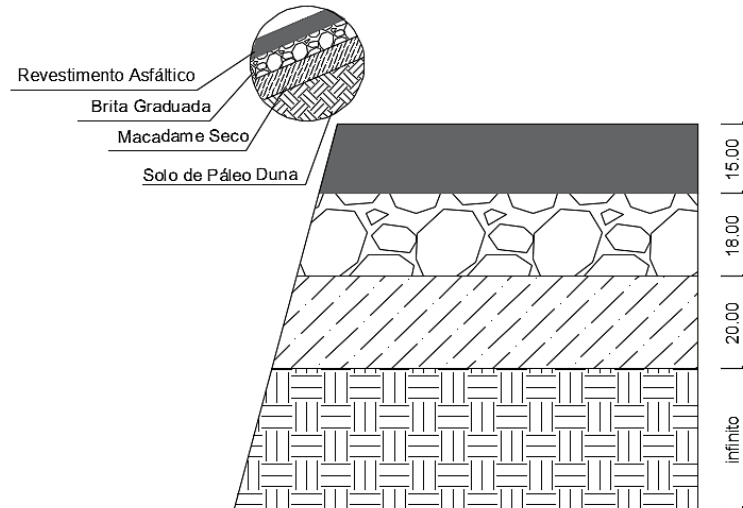
¹ BGS: Brita Graduada Simples

Fonte: Melo, (2014) e Pérez, (2016).

Para avaliação mecanicista proposta, considerou-se a espessura da camada de revestimento executado (15 cm para BR 101 e 6 cm para SC 360), porém, utilizando como características do revestimento asfáltico os dados relativos às misturas estudadas ao longo deste trabalho (mistura de referência e mistura modificada com

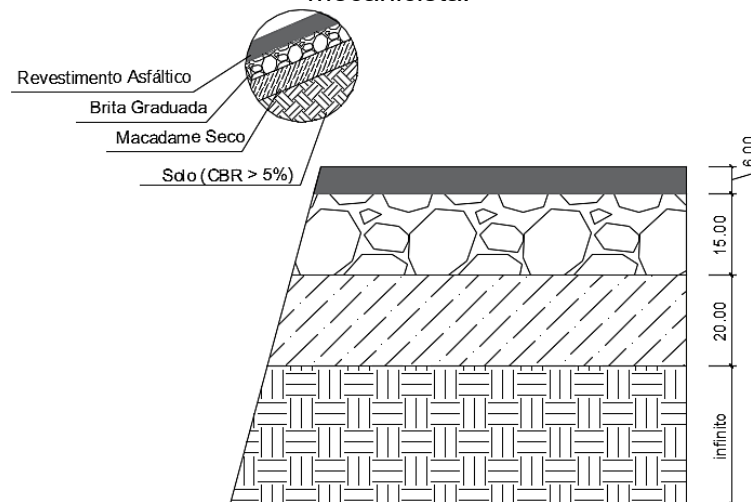
os teores otimizados de lã de aço e NTC). A Figuras 36 e 37 apresentadas a seguir esquematizam as estruturas de pavimento utilizadas.

Figura 36 - Estrutura de pavimento (trecho de Araranguá/SC) utilizada para avaliação mecanicista.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Figura 37 - Estrutura de pavimento (trecho de Urubici/SC) utilizada para avaliação mecanicista.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Os parâmetros elásticos (módulo resiliente e coeficiente de Poisson) da camada final de terraplenagem, da camada de sub-base e da camada de base correspondem a valores típicos observados na literatura para os materiais

empregados. Com relação ao coeficiente de Poisson da camada de revestimento asfáltico, utilizou-se o valor de 0,35. A Tabela 11, a seguir, sumariza os demais valores adotados no presente estudo.

Tabela 11 - Parâmetros elásticos (módulo resiliente e coeficiente de Poisson) das camadas constituintes da estrutura analisada.

Parâmetros elásticos	Camadas da estrutura do pavimento		
	Brita graduada	Macadame seco	Camada final de terraplenagem
E (MPa)	260	210	180
ν	0,35	0,35	0,40

Fonte: Adaptado de Melo, (2014).

Os parâmetros viscoelásticos de ambas as misturas foram obtidos com o software *Viscanalyse*®, elaborado pelo antigo LCPC, atual Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFFSTAR). Estes parâmetros foram extraídos para o modelo de Huet-Sayegh, cuja equação permitiu calcular os valores de módulo dinâmico em função da frequência de carregamento e da temperatura do revestimento na simulação numérica.

A partir do modelo, o *software* calculou os valores de módulo dinâmico que foram então utilizados para simular a estrutura do pavimento através de um segundo software (*Viscoroute*®), também desenvolvido pelo IFFSTAR (em parceria com a École Nationale des Ponts et Chaussées - ENCP), a fim de obter a deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico (considerando a mistura asfáltica de referência e a mistura modificada).

Assim, ao final das simulações foi possível confrontar quatro cenários de desempenho para cada estrutura de pavimento analisada, considerando as curvas de fadiga obtidas para: a mistura de referência sem reparação (C_{en1}), a mistura de referência reparada (C_{en2}), a mistura modificada sem reparação (C_{en3}) e, por fim, a mistura modificada reparada (C_{en4}). Estes cenários, associados às curvas de fadiga obtidas nas Etapas 4 e 5, permitiram inferir o número de solicitações do eixo padrão rodoviário que causaria a ruptura por fadiga do revestimento asfáltico. Para todas as simulações numéricas foi adotado um fator campo/laboratório igual a 1, com o intuito de simplificar e padronizar a simulação numérica, bem como o comparativo entre ambas as estruturas estudadas.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos ao longo da execução do plano experimental proposto.

4.1 ETAPA 1 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Agregados

A caracterização dos agregados utilizados ao longo do plano experimental é apresentada na Tabela 12. Além dos valores médios obtidos para as amostras ensaiadas, são apresentados os intervalos de aceitação (para utilização em camada de rolamento), de acordo com a Metodologia Superpave (Asphalt Institute, 2001).

Tabela 12 - Resumo da caracterização dos agregados pétreos utilizados em camada de rolamento, intervalos de aceitação (Superpave) e normativas empregadas.

Ensaio	Norma	Limites ¹	Resultado	Unidade
Abrasão Los Angeles	ASTM C 131	35-45% máx.	18,64	%
Absorção do Agregado Graúdo	ASTM C 127	-	1,43	%
Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso	DNER ME 078	-	0,40% "dope"	-
Angularidade do Agregado Graúdo	ASTM D 5821	100%/100%	100	%
Angularidade do Agregado Miúdo	ASTM C 1252	45% mín.	52,36	%
Equivalente de Areia	AASHTO T 176	50% mín.	71,95	%
Índice de Forma	ABNT NBR 6954	-	CÚBICA	-
Massa Esp. Aparente do Agregado Graúdo	ASTM C 127	-	2,592	g/cm ³
Massa Esp. Real do Agregado Graúdo	ASTM C 127	-	2,648	g/cm ³
Massa Esp. Real do Agregado Miúdo	DNER ME 084	-	2,674	g/cm ³
Massa Esp. Real do Material Pulverulento	DNER ME 085	-	2,803	g/cm ³
Materiais Deletérios	AASHTO T 112	0,2-10% máx.	0,00	%
Sanidade	ASTM C 88	10-20% máx.	1,59	%

¹ Os limites apresentados aplicam-se a materiais utilizados em camada de rolamento.

Fonte: Elaboração própria, (2020).

Através dos resultados apresentados na Tabela 12, é possível observar que o material pétreo utilizado apresenta adequada resistência à degradação mecânica, uma vez que o ensaio de Abrasão Los Angeles resultou em uma porcentagem de perda inferior ao limite máximo normatizado. Tal fator pode ser traduzido em menor desgaste da partícula de agregado quando submetida às etapas de britagem, armazenamento, compactação e também pela solicitação imposta pelo tráfego.

Entretanto, não foram verificadas condições satisfatórias de adesividade entre a partícula de agregado e o ligante asfáltico. Para o ensaio referência, observou-se o descolamento do filme de ligante nas partículas de agregado. Já para 0,20% de aditivo melhorador de adesividade “dope”, o descolamento do ligante asfáltico foi verificado apenas em pequenos pontos isolados, somente em alguns agregados dentro da amostra total. As amostras com teores de 0,40% e 0,60% de aditivo incorporado apresentaram-se satisfatórias, demonstrando que – para essa condição – não há tendência de descolamento da película de ligante da superfície do agregado. Desta forma, incorporou-se 0,40% de “dope” ao ligante asfáltico para todas as etapas de dosagem e moldagem seguintes.

Quanto aos valores de sanidade, percebe-se uma baixa suscetibilidade dos agregados à ação deletéria ocasionada pelo intemperismo, resultando em um dano calculado (após 5 ciclos de imersão em solução de sulfato de sódio) de 1,59%. Em termos de presença de argilominerais, o resultado de equivalente de areia aponta baixa presença destes, indicando um material pétreo consideravelmente “limpo”. Da mesma forma, pelo ensaio de materiais deletérios, não foi constatada a presença de materiais friáveis impregnados na superfície do agregado.

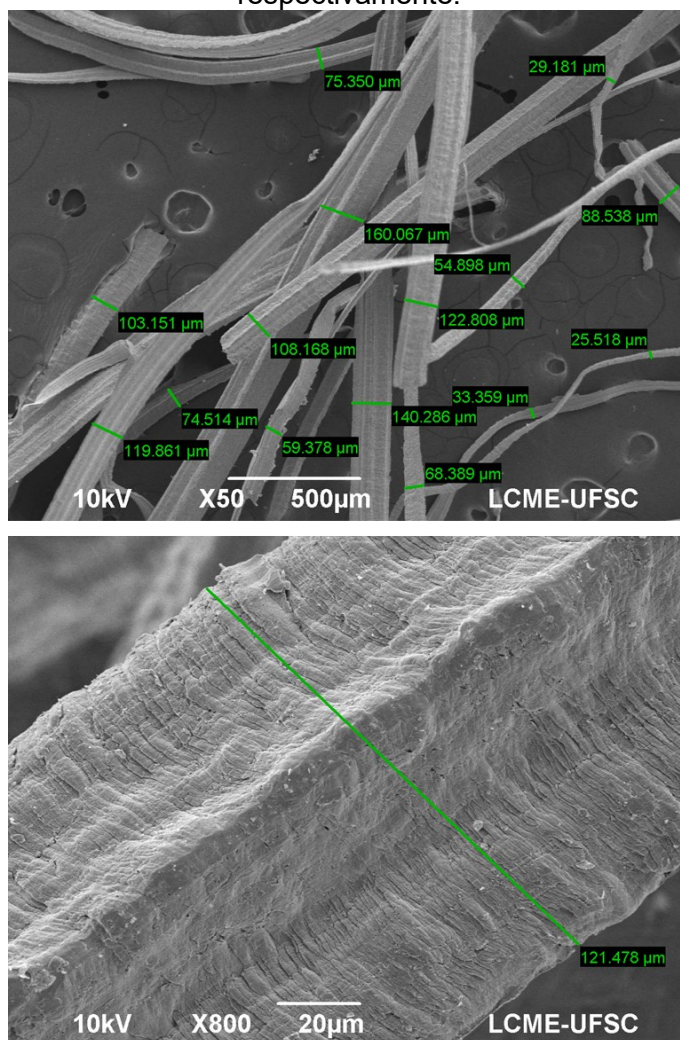
Quanto à angularidade, a avaliação visual das partículas de agregado graúdo converge para um material 100% fraturado, enquanto a angularidade do agregado miúdo apresentou valor de 52% (superior ao limite mínimo preconizado pela normativa – 45%, Asphalt Institute, 2001); ambos os resultados indicando um adequado atrito interno dos agregados, contribuindo no intertravamento da mistura. Pelo índice de forma, das 100 amostras de agregado graúdo avaliadas, verificou-se que a maior parcela apresenta forma cúbica (68%); enquanto 31% das partículas possuem forma alongada e 1% lamelar. Esta proporção indica um material de forma majoritariamente cúbica, sendo enquadrado nos limites Superpave (relação 1:3), com valor máximo normatizado de 35% de partículas lamelares/alongadas.

4.1.2 Lã de aço e NTC

4.1.2.1 Análise morfológica

As características morfológicas das incorporações utilizadas ao longo da pesquisa, obtidas através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) pertencente ao Laboratório Central de Microscopia Eletrônica – LCME da UFSC, são apresentadas a seguir. A Figura 38 apresenta a micrografia obtida para a fibra de lã de aço.

Figura 38 – Imagens geradas a partir da microscopia eletrônica de varredura, apresentando o aspecto superficial e forma das fibras de lã de aço. Aproximações de 50 e 800 vezes, respectivamente.

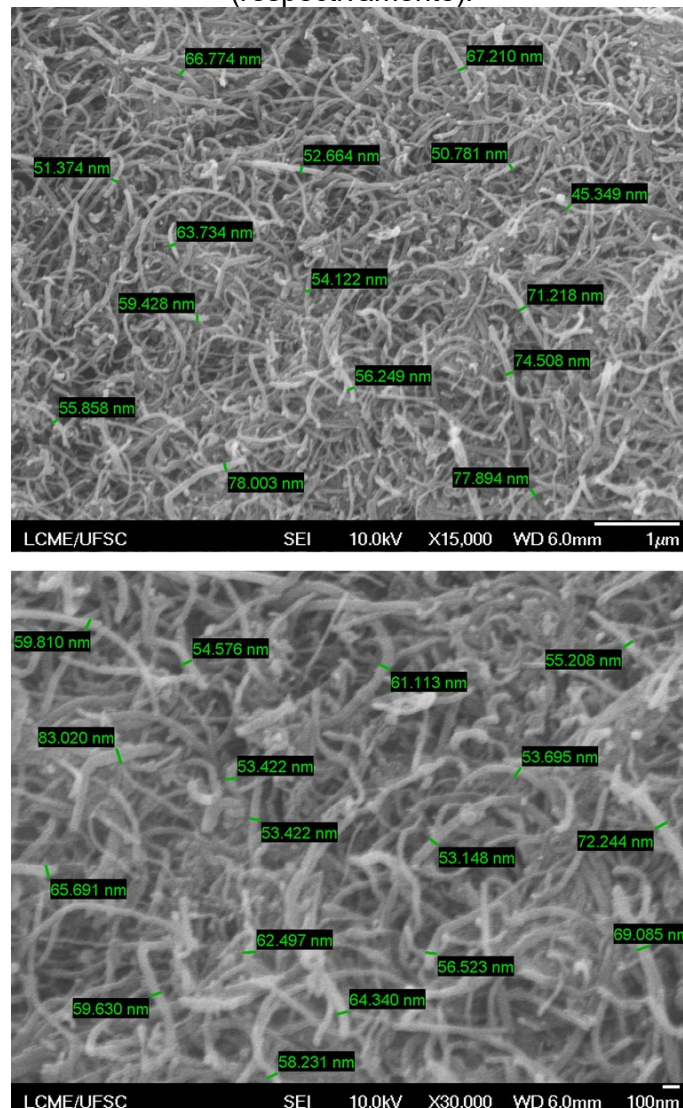


Fonte: Elaboração própria, (2020).

Conforme observado na Figura 38, a fibra de lã de aço apresentou superfície rugosa, com aspecto “escamado” ao longo do seu comprimento. Em termos de forma, o material metálico apresenta diâmetro situado no intervalo entre 25 μm e 160 μm , com valor médio de aproximadamente 85 μm e desvio padrão de 41 μm (para a amostra selecionada), abaixo dos valores especificados pelo fabricante.

Quanto ao NTC, quando utilizado o microscópio de varredura eletrônico convencional, as imagens geradas não apresentaram nitidez adequada. Desta forma empregou-se o microscópio eletrônico MEV-FEG, que permitiu obter imagens com melhor resolução através da aplicação de alto vácuo, conforme apresentado na Figura 39.

Figura 39 - Micrografia dos nanotubos de carbono utilizando a técnica de alto vácuo, com ampliação de 15.000 e 30.000 vezes e marca de escala de 1 μm e 100 nm (respectivamente).



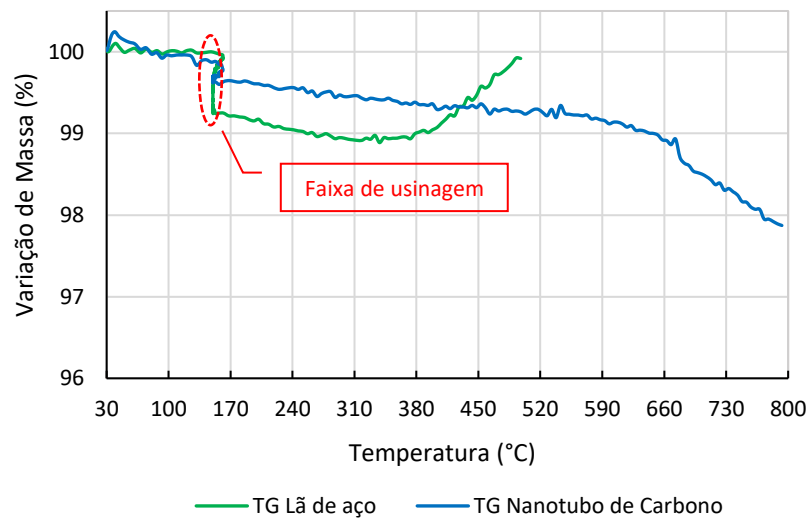
Fonte: Elaboração própria, (2020).

Em relação à medida dos diâmetros dos nanotubos de carbono, foi utilizada ampliação de 100.000 vezes, buscando obter maior nível de acurácia. Desta forma, obtiveram-se diâmetros situados dentro do intervalo, especificado pelo fabricante, de 50 a 80 nm. Destaca-se que as medidas foram obtidas em diferentes pontos da amostra.

4.1.2.2 Análise termogravimétrica

O comparativo entre o comportamento da lã de aço e dos nanotubos de carbono em termos de variação de massa em função do aumento da temperatura é apresentado na Figura 40.

Figura 40 – Curvas TG obtidas para a lã de aço e o NTC, quando submetidos a temperaturas de até 500 °C e 800 °C, respectivamente.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

A análise da Figura 40 indicou baixa suscetibilidade da lã de aço a elevações acentuadas de temperatura. Para um aquecimento máximo de 500 °C, a lã de aço apresentou perda de massa máxima em valor ligeiramente acima de 1%. Esta perda de massa ocorreu de forma mais intensa quando em um intervalo de temperatura situado entre 150 °C e 380 °C, estando relacionada à água adsorvida e/ou algum material orgânico presente na superfície da fibra. Na faixa de aquecimento entre 380

°C e 500 °C, observou-se um ganho de massa de aproximadamente 1% para a lã de aço.

Com relação aos nanotubos de carbono, pela análise da Figura 40 observa-se que o material se manteve estável termicamente até uma temperatura próxima a 600 °C, apresentando perda de massa inferior a 1%. Na faixa de temperatura situada entre 600 °C e 800 °C, ocorreu a acentuação da perda de massa da amostra – embora ainda pequena – atingindo perda final próxima a 2%.

Um aspecto importante a ser ressaltado, para ambos os materiais, corresponde à oscilação verificada na temperatura de 150 °C. Esta temperatura coincide com o patamar de aquecimento entre a primeira e a segunda etapas de aquecimento (estabelecido na metodologia como um intervalo de 30 minutos, com o objetivo de simular o tempo de compatibilização entre o material incorporado e o ligante asfáltico no procedimento de modificação), no qual há uma variação de massa mais expressiva.

Esta perda está associada às fibras de lã de aço e nanotubos de carbono que compunham a amostra e que apresentavam defeitos superficiais. Neste patamar de aquecimento, as partículas defeituosas dos materiais e os resíduos gerados durante a síntese destes (durante o patamar de aquecimento a 150 °C) provocam a oscilação observada no gráfico da Figura 40. Ainda assim, as perdas de massa verificadas para a lã de aço e o NTC são inferiores a 1%.

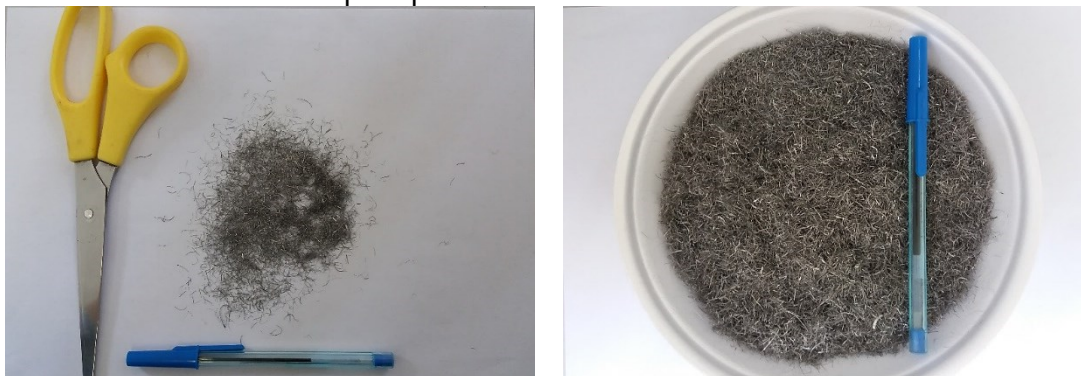
Sob o viés da prática de pavimentação, foi possível inferir que ambos os materiais estudados apresentam desempenho adequado em termos de sensibilidade térmica quando submetidos às temperaturas de mistura (próxima a 150 °C) e compactação (próxima a 140 °C), uma vez que os valores de perda e ganho de massa neste intervalo de temperatura não ultrapassam 1%. Assim, conclui-se que utilizando atmosfera inerte não ocorre degradação estrutural da lã de aço e do nanotubo de carbono nas temperaturas nas quais estes serão utilizados nas etapas subsequentes, mantendo suas funcionalidades.

4.1.2.3 Análise do comprimento médio das fibras de lã de aço

Conforme descrito no método, as fibras de lã de aço foram cortadas manualmente, procurando obter um nível satisfatório de homogeneidade nos

comprimentos individuais. A Figura 41 apresenta o aspecto obtido após o procedimento de corte do material. Ressalta-se que, após a etapa de corte, o material foi armazenado em recipientes contendo sachês de sílica gel, com o intuito de prevenir o possível contato da lã de aço com a umidade presente no ambiente.

Figura 41 - Processo manual de corte dos rolos de lã de aço e aspecto final do material, para posterior armazenamento.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Após a análise estatística realizada com o auxílio do software GIMP®, obteve-se como comprimento médio característico das fibras de lã de aço o valor de 5,8 mm, aproximadamente 6 mm. Entretanto, cabe ressaltar que a composição da amostra aleatoriamente selecionada apresentou 38% das fibras com comprimento entre 2 e 4 mm, 22% das fibras no intervalo entre 4 e 6 mm, 20% com comprimento entre 6 e 8 mm e 20% com comprimento superior a 8 mm. Não foram observadas fibras com comprimento inferior a 2 mm.

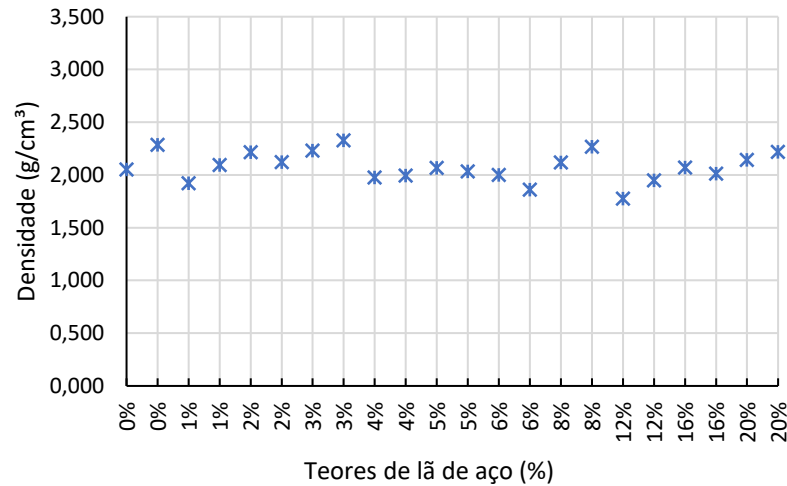
4.2 ETAPA 2 - OTIMIZAÇÃO DOS TEORES DE MATERIAL INCORPORADO (LÃ DE AÇO E NTC)

4.2.1 Teor ótimo de fibras de lã de aço

A proporção ideal de fibras de lã de aço a ser incorporada à mistura asfáltica fina (MAF) foi balizada através da avaliação dos parâmetros elétricos e térmicos do material. Neste subitem, estão inicialmente apresentados os resultados referentes aos diferentes teores de fibras metálicas, em termos de variação na resistência elétrica.

Previamente à discussão dos resultados obtidos, são apresentadas graficamente na Figura 42 as densidades geométricas (calculadas a partir de medidas de volume e massa) das amostras de MAF utilizadas.

Figura 42 - Avaliação da densidade geométrica das amostras de MAF contendo os diferentes teores de fibras de lã de aço.



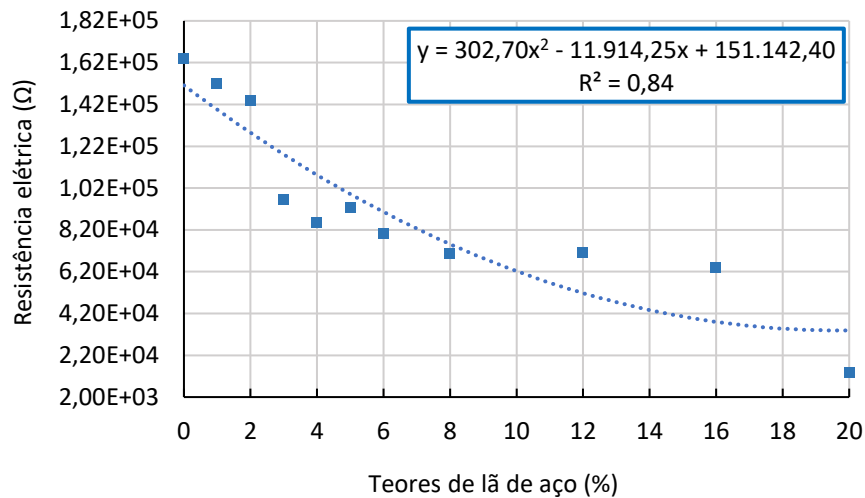
Fonte: Elaboração própria, (2020).

Conforme observado no gráfico da Figura 42, por se tratar de uma mistura asfáltica fina, as densidades geométricas (valor médio: 2,078 g/cm³ e desvio padrão: 0,14 g/cm³) correspondem a valores abaixo das densidades características de misturas. Este aspecto está associado à influência da maior quantidade de ligante asfáltico na MAF.

4.2.1.1 Parâmetros elétricos

O comportamento da mistura asfáltica fina em termos de resistência elétrica média, sob corrente contínua, considerando as variações no teor de lã de aço propostas e os respectivos pares de amostras é apresentado na Figura 43.

Figura 43 - Variação nos valores de resistência elétrica média para amostras de MAF contendo diferentes teores de fibra de lã de aço, calculados utilizando multímetro digital sob corrente contínua.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

É demonstrado através da Figura 43 que a incorporação de lã de aço, nos teores propostos de 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 8%, 12%, 16% e 20%, promoveu uma redução da resistência elétrica das amostras de MAF quando comparada a amostra de referência, indicando uma menor oposição do material à passagem da corrente elétrica ao longo da amostra. Esta redução se deu de maneira gradativa, acentuando-se à medida em que maiores teores de lã de aço foram incorporados.

Para a amostra de referência, o valor de resistência elétrica médio obtido foi de $1,64 \times 10^5 \Omega$. O menor valor obtido corresponde a 20% de fibra de lã de aço incorporada, apresentado redução na resistência elétrica com valor médio resultante de $1,35 \times 10^4 \Omega$; valor aproximadamente 90% menor quando comparado ao resultado obtido para a amostra de referência.

Embora o teor de 20% de lã de aço tenha apresentado melhor desempenho em termos de redução da resistência elétrica, esta proporção de incorporação resultou em menor dispersão das fibras na mistura, devido à formação de grumos (constatada em análise complementar). A dificuldade de dispersão das fibras metálicas é um aspecto também observado em pesquisas como as de Garcia *et al.* (2009; 2014) e Franesqui *et al.* (2017). Isto posto, mesmo que para um processo de mistura e compactação manual da mistura asfáltica fina, e para amostras de dimensões

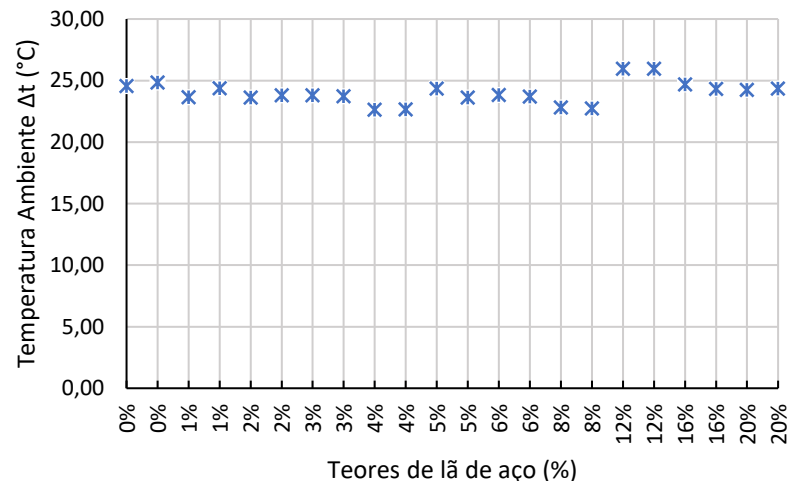
consideravelmente menores quando comparadas às dimensões das amostras das etapas subsequentes, priorizou-se assegurar um adequado processo de mistura e homogeneização.

Desta forma, a proporção de lã de aço cujo desempenho em termos de redução da resistência elétrica deu-se de forma satisfatória ($6,41 \times 10^4 \Omega$, aproximadamente 60% em relação à amostra de referência), porém apresentando menor comprometimento do processo de mistura ou moldagem devido à má dispersão do material metálico, corresponde ao teor de 16%.

4.2.1.2 Parâmetros térmicos

Previamente à discussão dos resultados obtidos na avaliação da condutividade térmica das amostras de MAF contendo os teores de fibra de lã de aço propostos, é apresentado na Figura 44 o controle da temperatura ambiente (Δt) durante as análises realizadas, uma vez que este é um fator de influência nas medições.

Figura 44 - Variação da temperatura ambiente (Δt) durante a realização do ensaio de condutividade térmica da MAF para as variações no teor de lã de aço propostas.

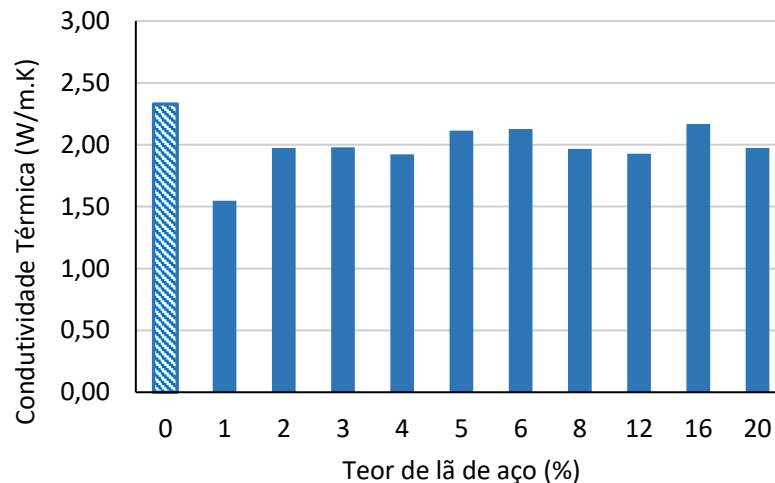


Fonte: Elaboração própria, (2020).

Observa-se na Figura 44 que os valores se encontram em uma faixa bastante próxima (valor médio: 24 °C e desvio padrão: 0,90 °C), cujo valor mínimo corresponde a 23 °C e o valor de máximo a 26 °C. No decorrer do ensaio também foi controlada a variação de temperatura entre o ambiente e a amostra (Δc), onde, para nenhum dos

teores testados, foi observada variação superior a 1,1 °C. Com relação ao resultado de condutividade térmica, é importante considerar a medida da densidade geométrica das amostras (Figura 42). A Figura 45 apresenta os resultados médios obtidos para os pares de amostras de MAF contendo fibras metálicas.

Figura 45 - Comportamento das amostras de MAF contendo diferentes teores de fibra de lã de aço em termos de condutividade térmica (W/mK).



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Uma vez que a condutividade térmica sofre influência da porosidade e, devido à heterogeneidade das fibras metálicas e às variações nos teores de incorporação propostos, este parâmetro (porosidade) não se manteve constante para as 22 amostras. Esta influência também é retratada por Belini (2010) e Garcia *et al.* (2014), que apontam que a presença de ar estagnado no interior dos microporos dificulta a transferência de calor.

Outro aspecto observado na Figura 45 e reforçado na literatura diz respeito ao maior valor de condutividade lido para a amostra de referência em comparação às demais amostras, cuja composição envolve um material metálico (fibra de lã de aço) com potencial condutivo superior. Este aspecto é discutido por Han e Fina (2011) e Matos (2011), que apontam a existência de uma baixa eficiência na transferência de calor entre as partículas metálicas e a matriz, de modo que a maior condutividade térmica do fíler não pode ser completamente “aproveitada”, reduzindo assim a sua condutividade em comparação à matriz de referência (neste caso, a mistura asfáltica

fina). Nan *et al.* (1998) reforçam este conceito por meio da definição teórica chamada resistência de Kapitza (ou resistência térmica interfacial).

No entanto, os valores obtidos estão compreendidos dentro do intervalo 1,5 W/mK – 2,9 W/mK, próximo a faixas encontradas em pesquisas como as de García, Norambuena-Contreras e Partl (2013) (1,5 W/mK – 1,8 W/mK), Norambuena-Contreras e Concha (2016) (1,2 W/mK – 1,5 W/mK), ambas no contexto das misturas asfálticas densas com incorporação de fibra de lã de aço. Norambuena-Contreras e Concha (2016) também constataram a variação da condutividade térmica (para diferentes teores de fibra de lã de aço) com a porosidade das amostras, dentre os resultados obtidos pelos autores têm-se (1,33 / 0 / 5,98; 1,35 / 2 / 7,92; 1,29 / 4 / 8,67; 1,27 / 6 / 8,96 e 1,29 / 8 / 10,49) para condutividade (W/mK) / teor de lã de aço (%) / porosidade (%), respectivamente.

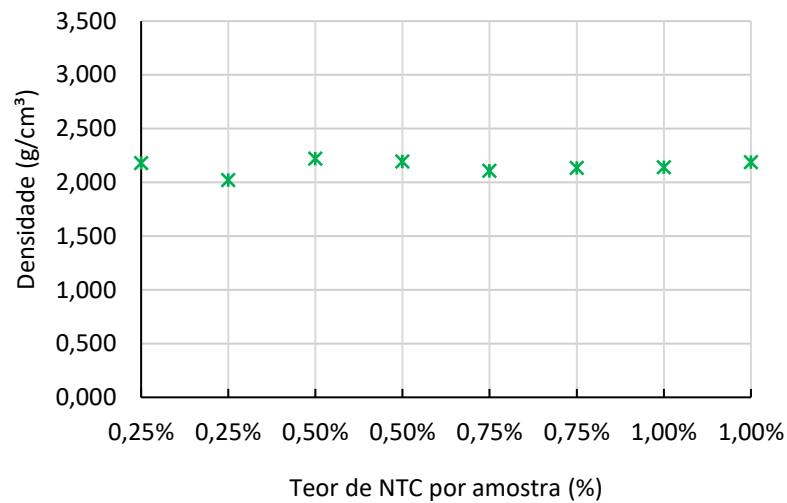
Confrontando os resultados obtidos para as amostras contendo teores de fibra de lã de aço incorporado, o par de amostras nas quais a maior condutividade térmica foi observada corresponde ao teor de 16%, atingindo um valor médio de 2,17 w/mK; teor que também apresentou maior uniformidade nas medidas entre amostras.

Desta forma, uma vez verificados valores satisfatórios no decréscimo da resistência elétrica (cerca de 60% em relação às amostras de referência) e aumento da condutividade térmica em relação aos demais teores de lã de aço, buscando evitar a redução no desempenho mecânico das etapas subsequentes devido ao excesso de fibras metálicas incorporadas, estabeleceu-se como teor ótimo de fibra de lã de aço a porcentagem de 16% (sobre peso de ligante asfáltico).

4.2.2 Teor ótimo de nanotubo de carbono

Previamente à apresentação dos resultados médios obtidos na análise dos parâmetros elétricos e térmicos dos pares de amostra de MAF contendo os diferentes teores de NTC (associados ao teor ótimo de fibra de lã de aço obtido de 16%), é apresentada a variação na densidade geométrica das amostras (Figura 46).

Figura 46 - Variação da densidade geométrica (g/cm^3) dos pares de amostra de MAF contendo os diferentes teores de NTC associados a 16% de lã de aço.



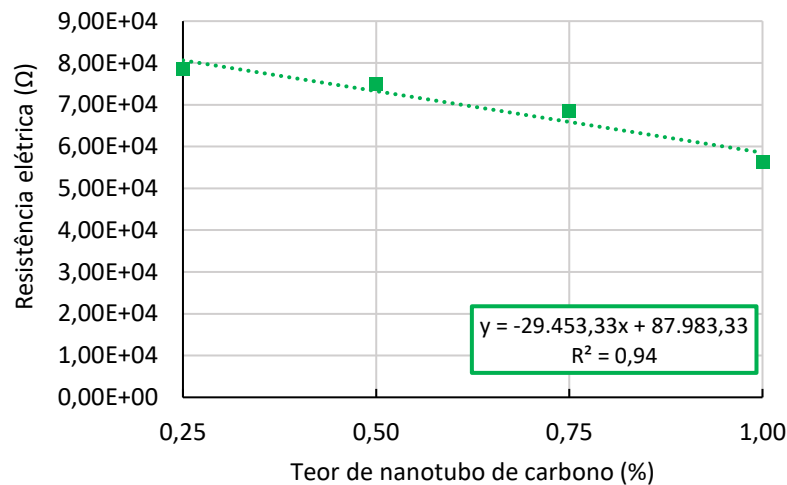
Fonte: Elaboração própria, (2020).

Através da Figura 46 observa-se que as densidades das amostras de MAF contendo os teores estabelecidos de NTC (0,25%, 0,50%, 0,75% e 1,0%) associados ao teor otimizado de lã de aço encontram-se na faixa entre 2,00 e 2,22 g/cm^3 , cujo valor médio alcançado corresponde a 2,147 g/cm^3 e o desvio padrão entre as amostras foi 0,06 g/cm^3 .

4.2.2.1 Parâmetros elétricos

Na análise da resistência elétrica média dos pares de amostra, realizada empregando corrente contínua, observou-se uma redução deste parâmetro com o acréscimo gradativo dos teores de NTC. A Figura 47 apresenta o comportamento obtido para a análise supracitada.

Figura 47 - Resistência elétrica para amostras de MAF contendo 16% de fibra de lã de aço e diferentes teores de NTC, obtidos através de multímetro digital.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Observa-se na Figura 47 que a porcentagem de incorporação na qual é verificada a menor resistência a passagem da corrente elétrica ($5,62 \times 10^4 \Omega$) corresponde a 1% de nanotubos de carbono. Nesta condição, a proporção de nanomaterial facilitaria a união entre os caminhos condutivos formados pelas fibras metálicas, potencializando a capacidade de condução de energia da MAF. Para validar a escolha do teor de nanotubos de carbono ideal fez-se uso – além dos parâmetros elétricos – da análise da condutividade térmica das amostras contendo os diferentes teores de NTC propostos.

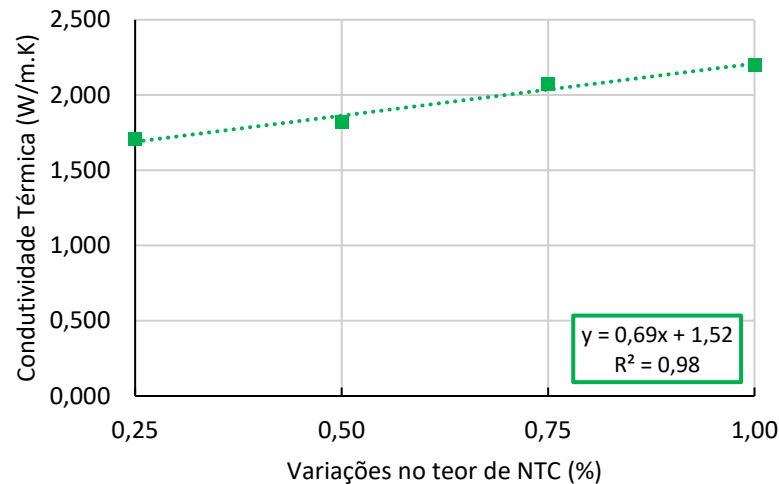
4.2.2.2 Parâmetros térmicos

Assim como para as amostras de MAF relativas à incorporação das fibras de lã de aço, na análise da variação da condutividade térmica com os diferentes teores de nanotubos de carbono o controle da temperatura ambiente também foi uma variável controlada. Obteve-se como temperatura ambiente média (Δt) durante a realização das medições o valor de $26,78 \text{ }^\circ\text{C}$ (desvio padrão: $0,62 \text{ }^\circ\text{C}$), tendo como diferença média entre a temperatura ambiente e a temperatura das amostras (Δc) menos de $1 \text{ }^\circ\text{C}$ ($0,964 \text{ }^\circ\text{C}$).

Analisando apenas as variações no teor de nanotubos de carbono, observa-se o aumento gradativo da condutividade térmica das amostras, apresentando uma

tendência linear de crescimento, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 48.

Figura 48 - Avaliação da condutividade térmica das amostras de MAF para os teores propostos de NTC, associados a 16% de fibra de lã de aço.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

De modo geral, sabe-se que os nanotubos de carbono apresentam elevada capacidade de condução térmica (Chu *et al.*, 2012; Yang e Qiu, 2017; Kumanek e Janas, 2019), porém, de acordo com Matos (2011), a condutividade térmica de nanocompósitos e/ou polímeros/NTC relativamente baixa comparado à capacidade intrínseca dos nanotubos se deve à resistência térmica interfacial entre o NTC e a matriz polimérica ou compósito circundante.

Para a mistura asfáltica fina em estudo, deve-se considerar ainda a diferença na dimensão dos materiais termo condutivos utilizados, sendo um nanométrico e o outro em escala milimétrica (fibra de lã de aço), além da diferença na capacidade de condução térmica inerente a cada material constituinte da MAF (fibra de lã de aço, NTC, ligante asfáltico e agregado pétreo). Desta forma, considerando não apenas a análise da condutividade térmica, mas também dos parâmetros elétricos do material estudado, o teor de NTC adotado correspondeu ao valor de 1% sobre peso de ligante asfáltico.

4.3 ETAPA 3 - DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

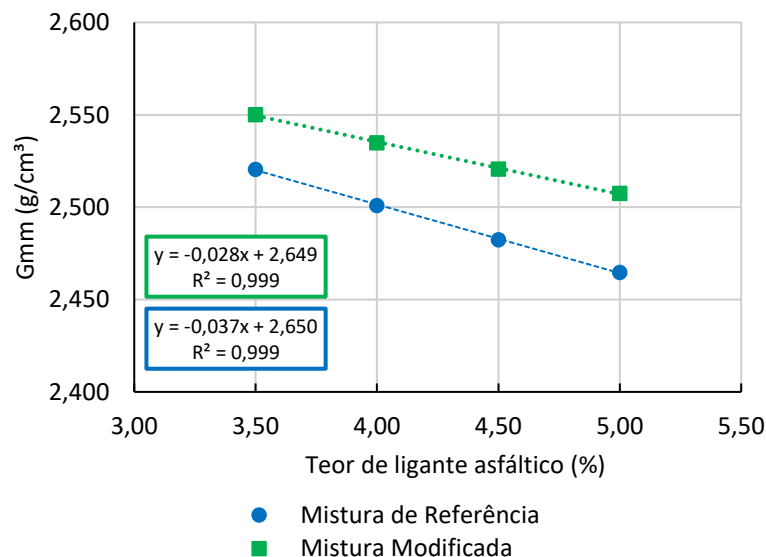
Previamente à discussão dos parâmetros volumétricos das misturas asfálticas, são apresentados os valores referentes à massa específica máxima (*Maximum Specific Gravity* - G_{mm}) para as quatro variações (3,5%, 4%, 4,5% e 5%) no teor de CAP propostas, obtidos por meio da aplicação de vácuo (preconizado na normativa ASTM D 2041). A Tabela 13 sintetiza os resultados, que são graficamente apresentados na Figura 49. Ressalva-se que os valores apresentados correspondem ao valor médio de duas amostras (no estado solto) por teor, totalizando 8 amostras, para cada mistura.

Tabela 13 - Valores médios da G_{mm} (g/cm^3) para as variações no teor de ligante asfáltico, de acordo com a normativa ASTM D 2041.

Teor de ligante (%)	G_{mm} Referência (g/cm^3)	G_{mm} Modificada (g/cm^3)
3,50	2,521	2,550
4,00	2,501	2,535
4,50	2,482	2,521
5,00	2,465	2,507

Fonte: Elaboração própria, (2019).

Figura 49 - Representação gráfica da redução dos valores de G_{mm} com o aumento dos teores de ligante asfáltico ensaiados para a mistura de referência e modificada, conforme ASTM D 2041.

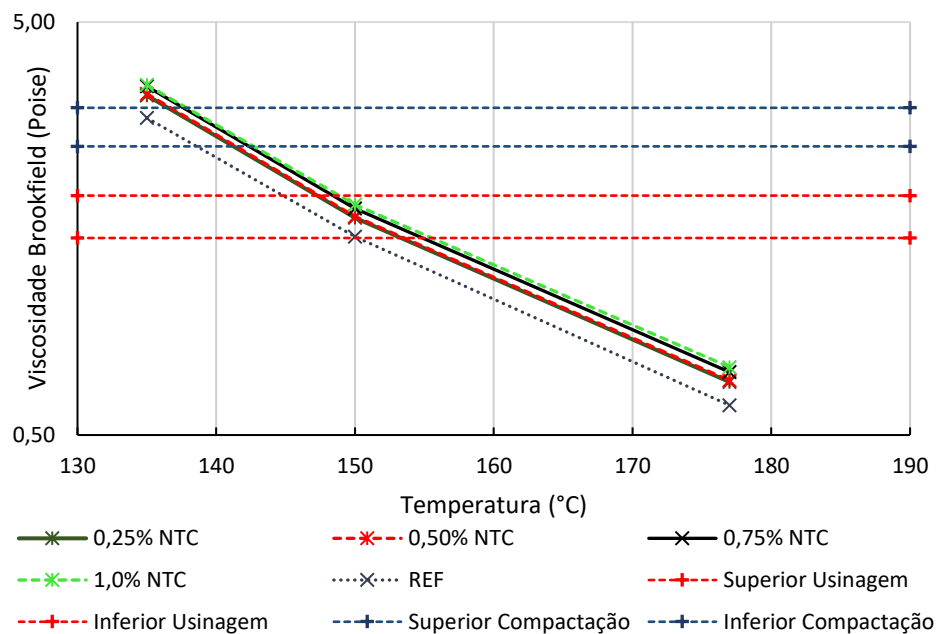


Fonte: Elaboração própria, (2020).

No que concerne aos ligantes asfálticos utilizados, são detalhadas na Figura 50 as curvas de viscosidade aparente *versus* temperatura para 135 °C, 150 °C e 175

°C para o ligante de referência e modificado com 1,0% de NTC. Complementar e comparativamente, são apresentados os valores para os teores de NTC intermediários (0,25%, 0,50% e 0,75% sobre peso de ligante asfáltico) evidenciando o aumento na viscosidade aparente do CAP à medida em que maiores teores de NTC são incorporados, embora os resultados tenham sido bastante próximos, uma vez que as variações entre teores de NTC não foram tão espaçadas.

Figura 50 - Valores de viscosidade aparente Brookfield obtidos para o ligante de referência e o ligante modificado com 0,25%, 0,50%, 0,75% e 1,0% de NTC, para as temperaturas de 135 °C, 150 °C e 175 °C.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

A partir do comparativo estabelecido na Figura 50, foi verificado que para as temperaturas de 135 °C e 150 °C, a incorporação de 1% de NTC resultou em um aumento de cerca de 16% na viscosidade do ligante asfáltico, enquanto para 175 °C este aumento correspondeu a aproximadamente 19%. A partir dos resultados obtidos nas curvas de viscosidade aparente *versus* temperatura, foram determinados os valores de temperatura de usinagem e compactação das misturas de referência e modificada com 1,0% de NTC (em destaque na Tabela 14).

Tabela 14 - Valores de viscosidade aparente Brookfield (Poise) e temperaturas de usinagem e compactação (valor intermediário da faixa) para o ligante asfáltico de referência e modificado com 0,25%, 0,50%, 0,75% e 1,0% de NTC.

Ligante	Viscosidade (Poise)			Temperatura (°C)	
	135 °C	150 °C	175 °C	Usinagem	Compactação
REF	2,93	1,51	0,59	148	137
0,25% NTC	3,32	1,68	0,67	150	140
0,50% NTC	3,35	1,69	0,68	150	140
0,75% NTC	3,49	1,77	0,71	151	141
1,00% NTC	3,52	1,81	0,73	153	142

Fonte: Elaboração própria, (2020).

É importante salientar que os valores apresentados correspondem ao valor intermediário da faixa, uma vez que são estabelecidos valores de máximo e mínimo também. A adoção do valor intermediário teve como objetivo resguardar o material de possíveis oscilações de temperatura (para mais e/ou para menos, evitando as zonas limites). Em relação à temperatura dos agregados, para ambas as misturas o material foi aquecido a temperatura 10 °C superior à temperatura de usinagem. Com base nas propriedades físicas dos agregados e da mistura asfáltica, foram estabelecidos os parâmetros volumétricos das misturas estudadas.

4.3.1 Mistura asfáltica de referência e mistura modificada

A dosagem das misturas asfálticas foi avaliada a partir dos requisitos estabelecidos pela metodologia Superpave (Asphalt Institute, 2001) para misturas submetidas a alto volume de tráfego. Desta forma, os resultados referentes a cada variação de teor proposta tiveram como base as limitações apresentadas na Tabela 15 para volume de vazios (V_v), relação betume-vazios (RBV), vazios do agregado mineral (VAM) e % da G_{mm} no número de giros de projeto (N_{Proj}).

Tabela 15 - Critérios volumétricos estabelecidos pela metodologia Superpave para misturas submetidas a alto volume de tráfego e respectivos resultados para mistura referência e modificada (16% de lã de aço e 1% de NTC).

Resultado da Dosagem Superpave				
Teor de ligante (%)	Vv (%)	RBV (%)	VAM mín (%)	% G _{mm} @ N _{Proj}
Critério	4	65-75	13	= 96%
Mistura Asfáltica de Referência				
3,50	7,50	47,23	14,21	92,50
4,00	5,43	59,56	13,43	94,57
4,50	4,35	67,88	13,53	95,65
4,65	4,02	70,32	13,56	95,98
5,00	3,25	76,17	13,61	96,75
Mistura Asfáltica Modificada				
3,50	8,81	42,91	15,42	91,19
4,00	7,76	50,11	15,56	92,24
4,50	6,96	56,20	15,90	93,04
5,00	5,17	66,26	15,34	94,83
6,53*	4,01	74,59	15,59	96,00

*obtido através do prolongamento gráfico da curva traçada e pela função "crescimento" do Excel.

Fonte: Elaboração própria, (2020).

Conforme a Tabela 15, para que os critérios da metodologia sejam atendidos, o teor ótimo de ligante asfáltico resultante do procedimento de dosagem da mistura asfáltica de referência equivale a 4,65% de CAP. Com o teor apresentado, ter-se-á o volume de vazios na mistura de 4% atendido, satisfazendo também os intervalos das demais limitações.

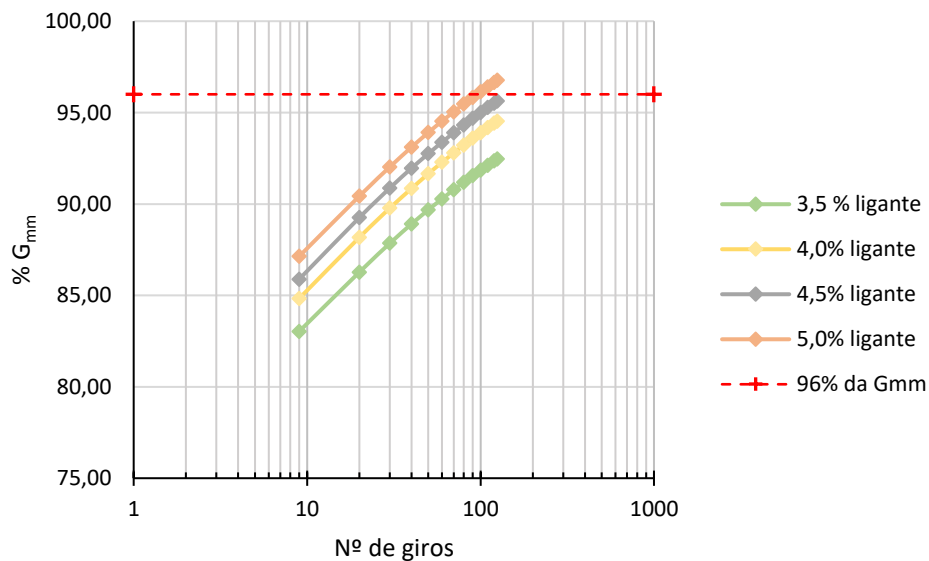
A mistura modificada, por sua vez, tem como teor ótimo para que seja atendido o critério de volume de vazios o valor de 6,53%. Tendo em vista que a composição granulométrica empregada foi a mesma, a necessidade de uma maior quantidade de ligante em comparação à mistura referência está relacionada à influência das fibras metálicas. Assim, tem-se que a incorporação da fibra de lã de aço ocasiona um aumento na área superficial da mistura, fator que acaba por consumir maior quantidade de ligante asfáltico.

Pesquisas como as de García *et al.* (2013; 2014), Norambuena-Contreras e García (2016), Franesqui *et al.* (2017), Gonzáles *et al.* (2018) e Gao *et al.* (2019) testaram diferentes teores de fibras metálicas e sua influência em parâmetros volumétricos e de desempenho de misturas asfálticas. O aumento do Vv devido ao incremento no teor de fibras metálicas foi observado em todos os trabalhos supracitados, sendo este mais intenso quanto maior a proporção de fibras. Em relação

ao teor de ligante asfáltico, Yang *et al.* (2016) reportaram maior consumo deste quando incorporadas fibras metálicas à mistura asfáltica para obtenção de um volume de vazios equivalente a 4%, sendo o teor obtido para a mistura de referência (sem fibras) 4,8% e para a mistura modificada aproximadamente 6%.

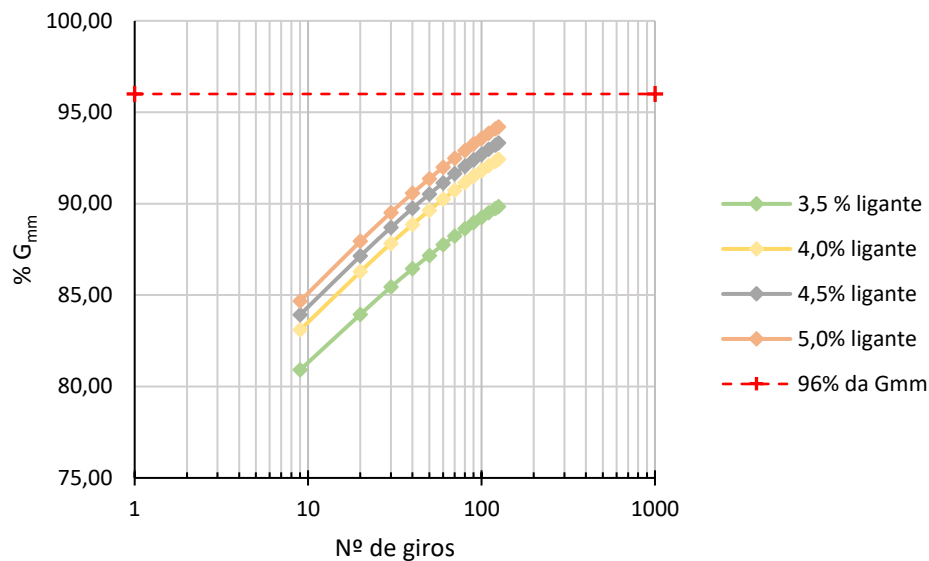
Outro aspecto apoia-se na rigidez natural do material metálico. Embora a elevação do teor de ligante asfáltico a partir do valor fixado contribua para obter a densificação apropriada no N_{Proj} , este ganho foi menos evidente na mistura com fibras. Isso porque, para que a densificação desejada seja alcançada, seriam necessários esforços de compactação superiores aos 125 giros, uma vez que as fibras metálicas dificultam o processo de amassamento empregado pelo compactador devido à rigidez intrínseca do material metálico. As hipóteses traçadas podem ser graficamente observadas nas curvas de compactação apresentadas nas Figuras 51 e 52.

Figura 51 - Curva de compactação para os diferentes teores de ligante asfáltico avaliados na dosagem da mistura de referência.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Figura 52 - Curva de compactação obtida no procedimento de dosagem da mistura asfáltica modificada (16% de lã de aço e 1% de NTC).



Fonte: Elaboração própria, (2020).

A Figura 51 corresponde à mistura referência, na qual observa-se que o parâmetro de 96% do valor da massa específica máxima (G_{mm}) no $N_{Projeto}$ é atingido no teor ótimo, que por sua vez corresponde a uma taxa de ligante dentro do intervalo pré-fixado de 4,5% e 5,0%. Quando observada a Figura 52 (referente à mistura modificada contendo 16% de fibra de lã de aço e 1% de NTC), percebe-se que para os teores previamente estudados (4,0%, $\pm 0,5\%$ e $+1,0\%$) o requisito não é atendido.

Este fator conduziu à inserção de mais um ponto na curva de dosagem, referente ao valor de 6,53% de ligante asfáltico (verificado pelo prolongamento gráfico do comportamento obtido para os teores de 3,5%, 4%, 4,5% e 5% e pela função crescimento do *software* Excel), dentro do qual o critério normatizado pôde ser confirmado.

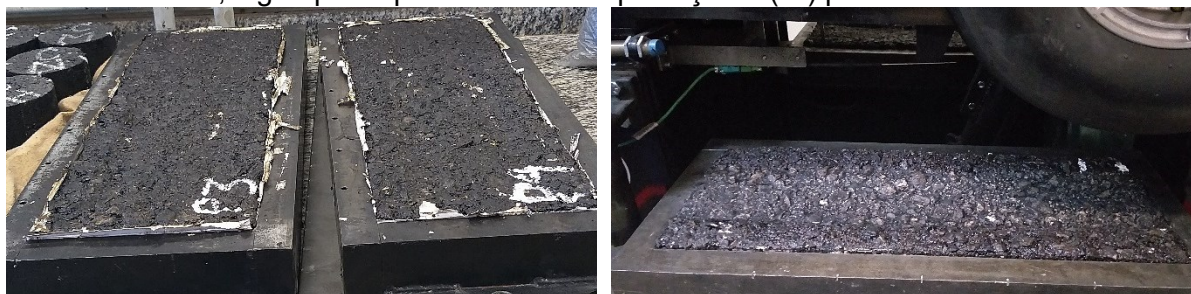
Ao final do procedimento de dosagem, ambas as misturas foram verificadas quanto ao $N_{máx}$ (205 giros). Nesta etapa, é requisito da metodologia Superpave que os corpos de prova mantenham um volume de vazios não inferior a 2%, em outras palavras, que não ultrapassem 98% da G_{mm} ; critério este que foi atendido tanto pela mistura de referência quanto pela mistura modificada.

4.4 ETAPA 4 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

4.4.1 Avaliação da deformação permanente

O desempenho das misturas propostas, em termos de deformação permanente, foi avaliado de acordo com o procedimento descrito na normativa AFNOR NF P 98-253-1. Para obtenção das medidas de afundamento na trilha de roda no decorrer dos ciclos propostos na metodologia, foram ensaiadas duas placas por mistura (denominadas como placa da direita e placa da esquerda, em relação à sua disposição no interior do equipamento *Orniéreur*). A Figura 53 ilustra: (1ª) duas placas relativas à mistura modificada (4,65% de ligante), logo após a compactação e (2ª) uma das placas moldadas disposta no interior do equipamento de ensaio.

Figura 53 – Etapas de confecção e ensaio das placas: (1ª) placas relativas à mistura modificada, logo após o processo de compactação e (2ª) placa sendo ensaiada.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Previamente à execução do ensaio, verificou-se o volume de vazios referente a cada placa (Tabela 16). Embora o volume de vazios seja superior a 4%, os valores obtidos encontram-se adequados para avaliação da deformação permanente. Uma vez que em campo, no início do horizonte de projeto, a mistura asfáltica apresenta volume de vazios superior ao da dosagem, o qual sofre redução durante as solicitações do tráfego, principalmente no início da vida útil. De acordo com Cominski *et al.* (1994), estudos têm mostrado que esta redução dos vazios é da ordem de 2% a 8%.

Ainda, somado ao exposto, outros testes de avaliação da deformação permanente de misturas, como por exemplo o ensaio uniaxial de carga repetida (*Flow Number*), normatizado pela ABNT NBR 16505, também utiliza corpos de prova com volumes de vazios superiores ao projeto, neste caso, com grau de compactação de

$97 \pm 0,5\%$ da G_{mb} obtida na dosagem. Por fim, sabe-se que a volumetria é um aspecto fundamental na formulação de misturas asfálticas, entretanto, o desempenho mecânico do material formulado é o critério decisório.

A dificuldade de confecção de placas no equipamento *Orniéreur* com um valor preestabelecido de volume de vazios também é abordada por Melo (2014) e Marcon (2017), que apontam a sensibilidade a variações milimétricas na espessura das placas, onde o aumento de 1 mm na espessura pode corresponder a um acréscimo de cerca de 2% no volume de vazios. A Tabela 16 sintetiza o volume de vazios obtido para as seis placas confeccionadas, além do valor médio para os respectivos pares de placas.

Tabela 16 - Volume de vazios medido para as 6 placas de deformação permanente confeccionadas.

Mistura	Vv (%)	Vv médio (%)
Ref (4,65%)	5,92	6,01
	6,09	
Modif (4,65%)	6,87	6,92
	6,96	
Modif (6,53%)	5,62	6,26
	6,90	

Fonte: Elaboração própria, (2020).

Outro aspecto a ser considerado (e apresentado na Tabela 16) diz respeito às placas da mistura modificada moldadas no teor de ligante relativo à mistura de referência (M_{Modif} 4,65%). Ao considerar a incorporação da fibra metálica como um aditivo final à mistura, era esperado que se obtivesse como resultado placas com volume de vazios superior às demais (aproximadamente 15% em relação à mistura de referência e 10% em relação à modificada no teor de 6,53% de ligante asfáltico).

Este aspecto está apoiado nas diferenças obtidas na dosagem de ambas as misturas, referência e modificada. Uma vez que a adição das fibras metálicas ocasiona um aumento na área superficial a ser recoberta pelo ligante asfáltico, faz-se necessário um maior consumo deste para atender aos critérios volumétricos. Além disso, tem-se a contribuição da rigidez intrínseca da fibra metálica, que acaba por exigir maiores esforços de compactação para atingir um determinado volume de vazios na mistura (mesmo que em seu teor ótimo, como observado na Tabela 16).

Neste sentido, a Tabela 17 apresenta os valores de deformação nos ciclos de interesse, para as placas da mistura de referência e para as placas relativas à mistura modificada (nos teores de 4,65% e 6,53% de ligante asfáltico).

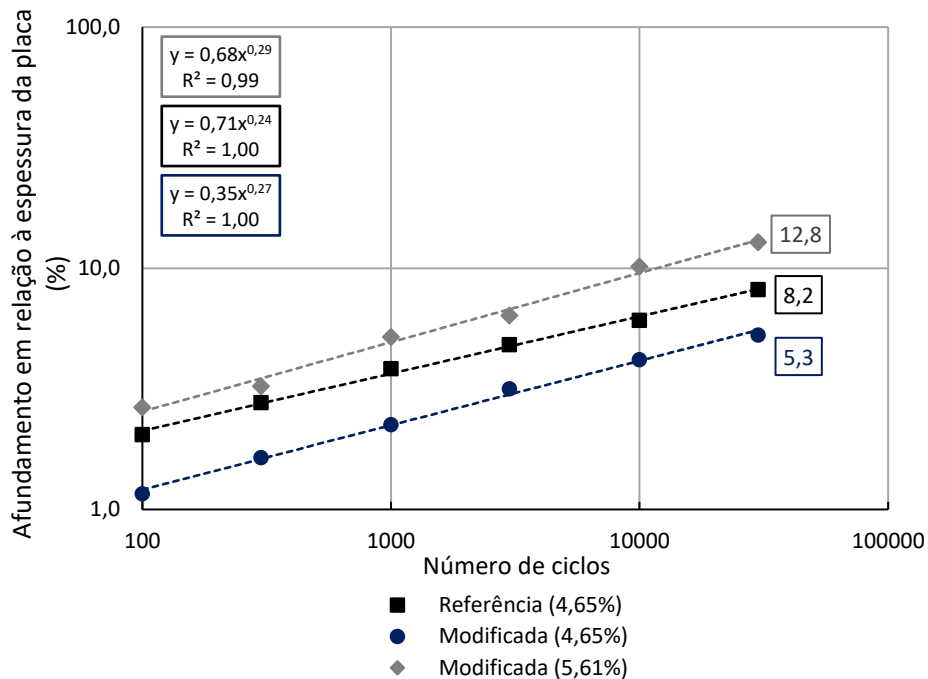
Tabela 17 - Medidas de afundamento para os conjuntos de placas (lado direito e lado esquerdo) referentes à mistura de referência e à mistura modificada (nos dois teores propostos: 4,65% e 6,53%).

Mistura	Nº de Ciclos	Afundamento Direita (%)	Afundamento Esquerda (%)	Afundamento Médio (%)
Ref (4,65%)	100	1,7	2,3	2,0
	300	2,2	3,3	2,8
	1.000	3,4	4,3	3,8
	3.000	4,3	5,3	4,8
	10.000	6,2	6,0	6,1
	30.000	8,2	8,2	8,2
Modif (4,65%)	100	1,2	1,1	1,2
	300	1,5	1,8	1,6
	1.000	2,1	2,4	2,2
	3.000	3,2	3,1	3,2
	10.000	4,1	4,2	4,2
	30.000	5,0	5,6	5,3
Modif (6,53%)	100	2,4	2,9	2,7
	300	3,2	3,3	3,2
	1.000	4,8	5,6	5,2
	3.000	6,0	6,7	6,4
	10.000	8,9	11,4	10,2
	30.000	10,1	15,6	12,8

Fonte: Elaboração própria, (2020).

Com base na Tabela 17, a fim de confrontar e comparar os valores finais de afundamento médio para as duas placas (direita e esquerda) relativos a cada uma das misturas ensaiadas, foram plotadas as porcentagens médias de afundamento para os ciclos 100, 300, 1000, 3000, 10.000 e 30.000. A Figura 54 ilustra o comportamento obtido, além do comparativo em relação ao critério francês que estabelece um limite máximo de 10% de afundamento ao final dos 30.000 ciclos de ensaio (AFNOR NF P 98-253-1).

Figura 54 - Comparativo, em termos de deformação permanente, para as diferentes misturas avaliadas (M_{Ref} , M_{Modif} (4,65%) e M_{Modif} (6,53%)), com o aumento no número de ciclos de carregamento.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Através da Figura 54 observa-se que, embora a mistura de referência tenha apresentado desempenho satisfatório em termos de deformação permanente (8,2% de afundamento ao final do ciclo 30.000), a incorporação das fibras e o uso de ligante asfáltico modificado com nanotubos de carbono alcançou um desempenho superior (5,3% de afundamento ao final dos 30.000 ciclos) no mesmo teor de ligante que a mistura de referência. Ou seja, o afundamento obtido ao final dos 30.000 ciclos para a mistura modificada (com teor de ligante asfáltico de 4,65%) correspondeu à aproximadamente 65% do valor obtido para a mistura de referência, indicando uma redução de cerca de 35% no valor de afundamento final.

É possível inferir que a mistura asfáltica contendo fibras de lã de aço se torna menos sensível à deformação plástica, parte pela distribuição das fibras no interior da mistura e parte pela rigidez característica da própria fibra metálica. As fibras bem distribuídas na mistura auxiliam no intertravamento do esqueleto mineral, reduzindo a ação de “escorregamento” da mistura asfáltica modificada (aproximadamente 35% menor em comparação à referência, para 30.000 ciclos) no mesmo teor (4,65%) de

ligante asfáltico. Estes resultados vão ao encontro de pesquisas como as de Guo *et al.* (2014) [fibras de lã de rocha e fibras de vidro] e Mateos e Harvey (2019) [fibras de aramida], na avaliação da resistência à deformação permanente.

Além da contribuição das fibras metálicas, o teor incorporado de 1% de NTC contribuiu para o aumento da capacidade de recuperação elástica da mistura asfáltica e do desempenho quanto à deformação permanente (aspecto também observado em pesquisas como as de Steyn *et al.* 2013; Melo, 2014; Goli *et al.* 2017 e Ashish e Singh, 2019), resultando em um menor afundamento acumulado ao final dos 30.000 ciclos de carregamento.

Assim, mesmo que as placas da mistura modificada tenham apresentado volume de vazios em média 15% maior em relação às placas da mistura de referência (ambas moldadas no teor de 4,65% de ligante asfáltico), o desempenho obtido foi superior em termos de deformação permanente. Pode-se observar que o efeito benéfico de incorporação da fibra metálica (redução da ação de escorregamento e melhoria do intertravamento da mistura asfáltica) se sobressaiu frente à redução no desempenho ocasionada pelo maior volume de vazios.

Com relação à mistura asfáltica modificada com 6,53% de ligante asfáltico, o desempenho inferior quanto à deformação permanente e o não cumprimento do requisito normatizado (afundamento máximo de 10% ao final dos 30.000 ciclos) pode ser explicado devido ao elevado teor de ligante asfáltico em relação à mistura de referência (6,53% *versus* 4,65%, respectivamente).

Ao contrário da M_{Modif} (4,65%), na M_{Modif} (6,53%) à medida em que o número de ciclos aumenta, o excesso de ligante recobrimo as fibras metálicas, que (isoladamente) possuem uma capacidade de condução térmica superior em relação aos agregados pétreos e o ligante asfáltico, faz com que a mistura apresente maior sensibilidade à tensão e deformação plástica causada pela passagem do rodado na temperatura de 60 °C (aproximadamente 57% em comparação à mistura de referência e 140% em relação à mistura modificada no teor de 4,65% de ligante asfáltico).

Assim, o excesso de ligante presente na mistura asfáltica faz com que os benefícios de redução da deformação permanente observados para a mistura usinada com teor de ligante asfáltico de 4,65% (associada à incorporação de 16% de fibra de lã de aço e 1% de nanotubo de carbono) não possam ser aproveitados pela matriz asfáltica. Ademais, o elevado teor de ligante asfáltico também desfavorece a fricção

entre os agregados pétreos que compõem a mistura, tornando-a mais suscetível ao afundamento (ABDO e JUNG, 2016).

Após confrontar as misturas estudadas com o limite máximo de afundamento normatizado, procedeu-se a subdivisão destas nas três classes de desempenho estabelecidas pela metodologia francesa, de acordo com sua respectiva porcentagem de afundamento ao final de 30.000 ciclos de carregamento. Barra *et al.* (2010) e Andrade (2018) propõem avaliar essa classificação traduzindo-a para a realidade climática do Brasil. Desta forma, as misturas asfálticas podem ser enquadradas em:

- a) Classe 1: apresentam porcentagem de afundamento ao final dos 30.000 ciclos de carregamento entre 7,5% e 10%. As misturas assim classificadas possuem aplicação em camadas de rolamento em regiões cuja temperatura ambiente esteja em torno de 15 °C.
- b) Classe 2: misturas com afundamento após 30.000 ciclos de carregamento entre 5% e 7,5%. Têm sua aplicação destinada a regiões com maior amplitude térmica ao longo do ano, variando entre 5 °C e 30 °C.
- c) Classe 3: corresponde à classe de valor mais restritivo, cujo afundamento máximo ao final de 30.000 ciclos deve ser $\leq 5\%$. Este tipo de mistura tem aplicação em rodovias com maiores solicitações do tráfego e que estejam localizadas em regiões de clima com temperatura mais elevada.

Observa-se que, para os resultados das misturas ensaiadas, a mistura de referência é classificada como uma mistura de classe 1, com afundamento ao final de 30.000 ciclos inferior a 10%. Já a mistura modificada (teor de 4,65%) é enquadrada na classe 2, uma vez que apresenta afundamento inferior ao limite de 7,5% e, portanto, menor sensibilidade térmica e melhor desempenho que a mistura de referência. Já a mistura modificada (teor de 6,53%), conforme discutido anteriormente, não atende ao limite normatizado e, conseqüentemente, não pode ser enquadrada nas classificações apresentadas.

Desta forma, o teor de ligante asfáltico utilizado na confecção das placas de concreto asfáltico para avaliação dos parâmetros reológicos, de fadiga e de reparação da mistura modificada, devido ao desempenho superior obtido, correspondeu ao teor de 4,65% (equivalente ao teor empregado para a mistura de referência). Não se torna

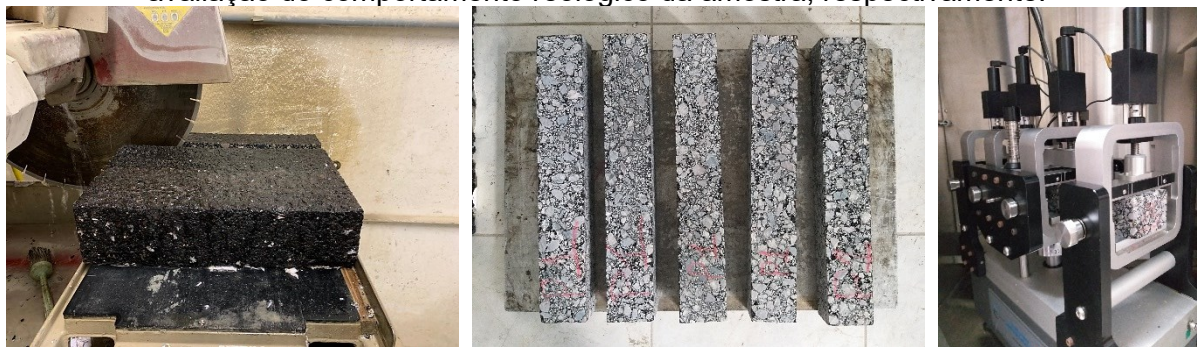
conveniente prosseguir a análise das demais propriedades considerando os dois teores para a mistura modificada (4,65% e 6,53%), uma vez que o teor de 6,53% não cumpre o requisito de desempenho à deformação permanente e este corresponde a um defeito observado de forma acelerada na degradação da estrutura do pavimento (MOURA, 2010; ZHANG *et al.*, 2020).

Outro fator que balizou esta decisão foi que misturas asfálticas com teor de ligante excessivo e com menor volume de vazios podem ser mais suscetíveis a sofrer deformações plásticas e distorções durante o processo de aquecimento, o que resultaria em menor eficiência na cicatrização (MORENO-NAVARO *et al.*, 2015; SALIH *et al.*, 2018). Isto pode ocorrer, pois sob o aquecimento induzido, a viscosidade do ligante reduz e ele expande, aumentando a pressão interna na microestrutura do concreto asfáltico, fazendo com que ocorra o movimento do ligante através dos vazios e microfissuras. Contudo, caso haja excesso de ligante e falta de espaço intersticial, ocorrem danos na microestrutura e, conseqüentemente, a redução da vida de fadiga.

4.4.2 Avaliação do comportamento reológico das misturas asfálticas

A seqüência de fotos apresentada na Figura 55 sintetiza as etapas que antecederam a caracterização reológica de ambas as misturas asfálticas: M_{Ref} (4,65%) e M_{Modif} (4,65%). Após a confecção das placas, as mesmas foram serradas (1ª imagem) a fim de extrair 5 corpos de prova (5,08 x 6,35 x 38,1 cm) por placa; em seguida (2ª imagem), os corpos de prova passaram por um processo de triagem, no qual foi verificada a geometria e volumetria das amostras; por fim (3ª imagem), deu-se início à avaliação reológica.

Figura 55 – Serragem das placas de fadiga, obtenção dos corpos de prova e ensaio para avaliação do comportamento reológico da amostra, respectivamente.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

A partir da triagem dos corpos de prova, foram calculados os volumes de vazios (%) das amostras da mistura de referência e modificada. Nesta seção, são apresentados os valores obtidos para os corpos de prova utilizados na avaliação dos parâmetros reológicos, sendo os demais valores apresentados na seção correspondente ao ensaio de fadiga. Desta forma, o corpo de prova relativo à mistura de referência apresentou volume de vazios de 5,26%, enquanto o corpo de prova da mistura modificada apresentou volume de vazios de 6,72%.

Utilizando as amostras supracitadas, com base no espectro de frequências e temperaturas propostos para a avaliação do comportamento reológico da mistura asfáltica de referência e da mistura asfáltica modificada, pôde-se analisar a suscetibilidade do material a alterações na frequência de carregamento e a variações na temperatura. As Tabelas 18 e 19 sintetizam o comportamento da mistura de referência e modificada (teor de ligante de 4,65%), em termos de módulo dinâmico, nas faixas de temperatura e frequência de carregamento propostas.

Tabela 18 - Valores de módulo dinâmico (MPa) obtidos para a mistura de referência, para as faixas de frequência e temperatura estudadas.

Frequência	T=0 °C	T=5,0 °C	T=10 °C	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	T=30 °C
Mistura de Referência							
0,1 Hz	16718	11200	6657	3141	1465	692	281
0,2 Hz	18294	12868	7984	4078	1989	955	289
0,5 Hz	20273	15090	10113	5557	2989	1495	532
1 Hz	21518	16561	11584	6830	3914	1979	755
2 Hz	22715	18019	13246	8226	4976	2760	1039
5 Hz	24358	20131	15546	10333	6683	3876	1703
10 Hz	25539	21707	17267	12064	8132	5006	2317
15 Hz	26209	22530	18150	13078	9014	5624	2715
20 Hz	27439	23919	20096	14458	9770	6119	3004

Fonte: Elaboração própria, (2020).

Tabela 19 - Valores de módulo dinâmico (MPa) obtidos para a mistura modificada, nas faixas de frequência e temperatura estabelecidas.

Frequência	T=0 °C	T=5,0 °C	T=10 °C	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	T=30 °C
Mistura Modificada							
0,1 Hz	13648	9603	6000	3537	1878	964	373
0,2 Hz	14824	10928	7120	4439	2461	1269	534
0,5 Hz	16494	12756	8857	5965	3532	1966	893
1 Hz	17656	14004	10124	7167	4474	2582	1267
2 Hz	18428	15333	11526	8567	5575	3338	1660
5 Hz	18999	17377	13638	10215	7249	4755	2615
10 Hz	19933	18856	15249	11808	8746	5992	3411
15 Hz	20783	19905	16278	12840	9809	6880	3930
20 Hz	21411	20708	17151	13322	10648	7720	4307

Fonte: Elaboração própria, (2020).

Os valores de módulo dinâmico, frequência de carregamento e temperatura apresentados nas Tabelas 18 e 19 permitem inferir que, nas temperaturas de ensaio mais baixas (0 °C, 5 °C e 10 °C), a mistura asfáltica modificada apresenta menor rigidez quando comparada à mistura de referência. Entretanto, a partir da temperatura de 15 °C percebe-se a inversão deste comportamento, onde a mistura modificada passa a apresentar maior rigidez.

Ao observar o comportamento da mistura de referência, verifica-se que o aumento da temperatura acaba por torná-la mais suscetível ao efeito do carregamento, fazendo com que, a partir de 15 °C, o módulo dinâmico sofra o decréscimo observado em comparação à mistura modificada.

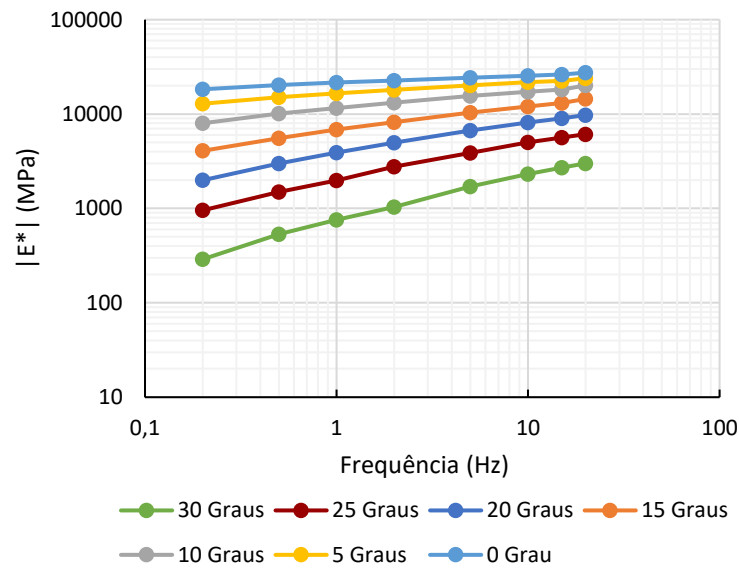
O aumento do módulo dinâmico observado para a mistura modificada a partir de 15 °C foi resultado de uma boa adesão entre a matriz asfáltica e as fibras metálicas, efeito favorecido pelo aspecto rugoso observado nas micrografias relativas à superfície da lã de aço. Devido a essa boa adesão, as fibras de lã de aço são capazes de suportar parte das tensões durante o carregamento, dissipando-as. Este aspecto também foi observado em estudos como os de Wu *et al.* (2007), Liu (2012) e Mohammed *et al.* (2020), que apontam que, neste contexto, menor é a parcela das tensões que chegam à matriz asfáltica.

Uma vez que a matriz asfáltica corresponde ao material com maior dependência à temperatura, devido à dissipação das tensões promovida pela lã de aço, a redução do módulo dinâmico da mistura asfáltica modificada se torna menos

expressiva. Este comportamento foi aprofundado na avaliação das curvas isotérmicas, das curvas isócronas e do espaço de Black, discutidos a seguir.

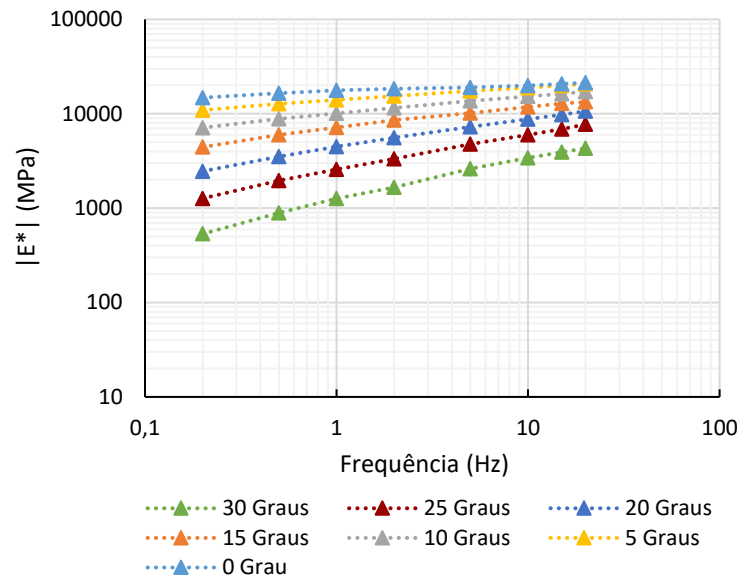
Nas curvas isotérmicas, são relacionados os valores de módulo dinâmico com os diferentes níveis de frequência, em função das diversas temperaturas de ensaio (conforme as Tabelas 18 e 19, anteriormente apresentadas). As Figuras 56 e 57 retratam este comportamento para a mistura de referência e modificada, respectivamente.

Figura 56 - Curvas isotérmicas da mistura asfáltica de referência, para as diferentes temperaturas ensaiadas.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Figura 57 - Curvas isotérmicas da mistura asfáltica modificada, para as diferentes temperaturas ensaiadas.



Um dos aspectos a ser observado nas Figuras 56 e 57 trata da suscetibilidade cinética das misturas: quanto menor a frequência de carregamento ao qual estas são submetidas, menor o módulo dinâmico. Neste contexto, maiores inclinações nas curvas geradas podem ser traduzidas em uma maior sensibilidade da mistura à frequência de carregamento. Desta forma, na Tabela 20 foram listadas as equações de correlação referentes às curvas apresentadas nas Figuras 56 e 57, permitindo caracterizá-las e compará-las em função de suas respectivas inclinações.

Tabela 20 – Suscetibilidade cinética das misturas referência e modificada para as diferentes temperaturas ensaiadas: inclinação das curvas analisadas.

Temperatura (°C)	Mistura de Referência			Mistura Modificada		
	Equação	R ²	Inclinação	Equação	R ²	Inclinação
30	$y = 717,32x^{0,5014}$	0,9949	0,5014	$y = 1194,60x^{0,4493}$	0,9951	0,4493
25	$y = 1950,00x^{0,4016}$	0,9950	0,4016	$y = 2497,60x^{0,3831}$	0,9973	0,3831
20	$y = 3723,40x^{0,3382}$	0,9922	0,3382	$y = 4311,90x^{0,3105}$	0,9955	0,3105
15	$y = 6597,20x^{0,2653}$	0,9947	0,2653	$y = 6907,40x^{0,2333}$	0,9898	0,2333
10	$y = 11310,00x^{0,1887}$	0,9922	0,1887	$y = 9948,30x^{0,1866}$	0,9963	0,1866
5	$y = 16270,00x^{0,1277}$	0,9937	0,1277	$y = 13864,00x^{0,1356}$	0,9978	0,1356
0	$y = 21270,00x^{0,0825}$	0,9930	0,0825	$y = 17162,00x^{0,0721}$	0,9735	0,0721

Fonte: Elaboração própria, (2020).

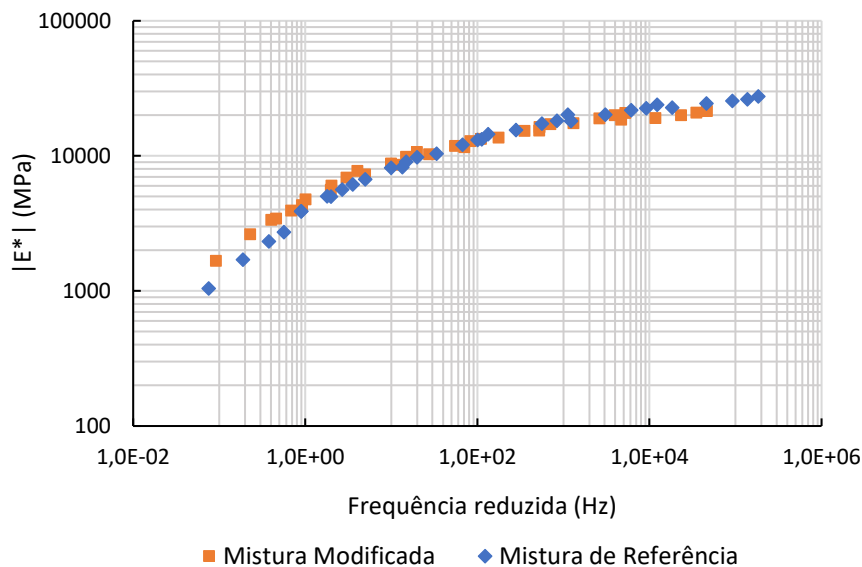
Através da Tabela 20 foi possível constatar que as maiores inclinações obtidas (tanto na mistura de referência quanto na mistura modificada) ocorrem em

temperaturas mais elevadas (ex. 30 °C) indicando maior sensibilidade do módulo dinâmico à frequência de carregamento sob esta condição, enquanto para temperaturas menores (ex. 0 °C e 5 °C) a influência da frequência de carregamento tende a ser minimizada (uma vez que as inclinações obtidas apresentam valor menor), aspecto que está relacionado a menor contribuição da parcela viscosa das misturas asfálticas nas baixas temperaturas.

Todavia, quando comparadas as inclinações obtidas entre misturas, foi possível notar que a incorporação da fibra de lã de aço e dos nanotubos de carbono reduziu a sensibilidade da mistura modificada à frequência de carregamento; tanto nas maiores, quanto nas menores temperaturas. Na temperatura de 30 °C a redução da inclinação foi de aproximadamente 10%, enquanto para a temperatura de 0 °C a inclinação foi cerca de 12% menor.

Esta redução da sensibilidade da mistura modificada à frequência de carregamento também pode ser observada através da sua respectiva curva mestra. Ao assumir a temperatura de translação de 20 °C, verifica-se a existência de um ponto de inversão de comportamento, conforme apresentado no comparativo entre a mistura de referência e a mistura modificada na Figura 58.

Figura 58 - Curvas mestras relativas às misturas de referência e modificada, para uma temperatura de referência de 20 °C.



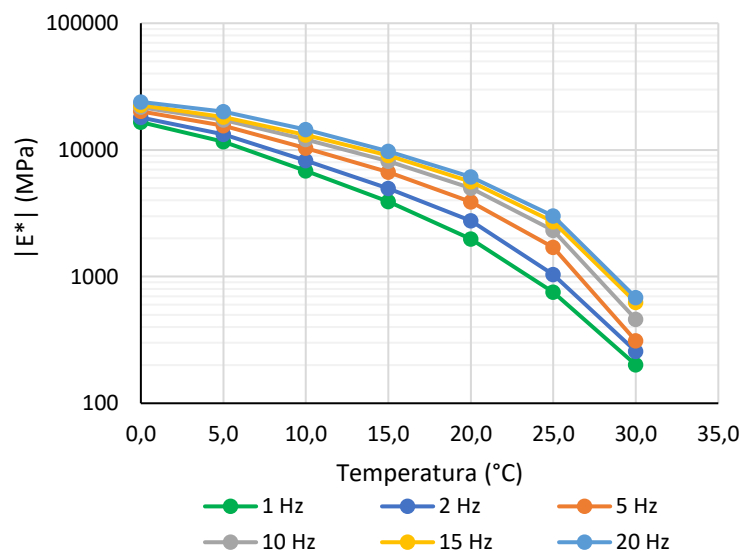
Fonte: Elaboração própria, (2020).

Observa-se na Figura 58 que, para a temperatura de referência de 20 °C, o ponto de inversão do comportamento entre as misturas está na frequência de 100 Hz. Para valores de frequência inferiores a 100 Hz, a mistura modificada apresenta maior módulo dinâmico. Porém, a partir de 100 Hz, a mistura de referência passa a apresentar módulo dinâmico superior em relação à modificada.

Uma vez que as frequências de carregamento usuais no pavimento estão abaixo de 25 Hz, constata-se que nesta condição a mistura modificada apresenta menor sensibilidade do módulo dinâmico em função da frequência de carregamento frente à mistura de referência. Esta redução está associada ao bom ancoramento da fibra de lã de aço à matriz asfáltica, facilitando a dissipação das tensões no interior da mistura à medida em que ocorrem os ciclos de carregamento.

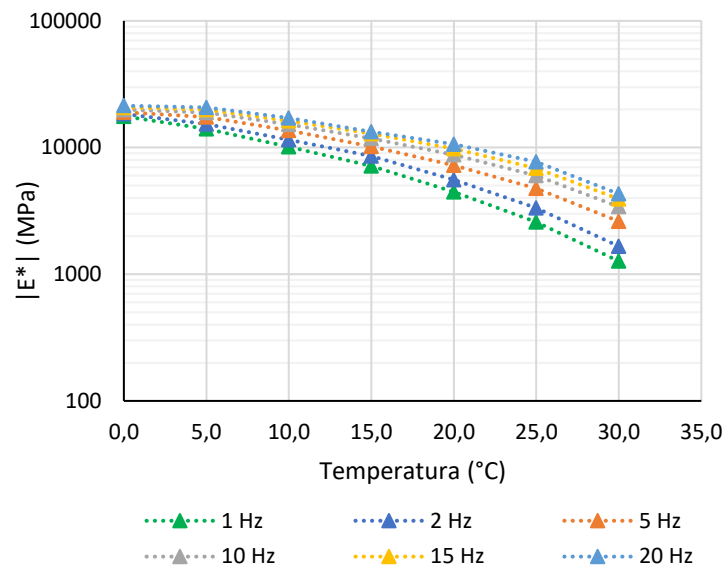
As curvas isócronas, por sua vez, objetivaram caracterizar a suscetibilidade térmica de ambas as misturas. Desta forma, foram relacionados o módulo dinâmico e a gama de temperaturas avaliadas, em função das diferentes frequências de ensaio; permitindo verificar a influência da temperatura no comportamento reológico das misturas. As Figuras 59 e 60 apresentam os resultados obtidos para a mistura de referência e modificada, respectivamente.

Figura 59 - Curvas isócronas da mistura asfáltica de referência, para as diferentes frequências estudadas.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Figura 60 - Curvas isócronas da mistura asfáltica modificada, para as diferentes frequências estudadas.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

De forma geral, observa-se nas Figuras 59 e 60 que quanto maiores as temperaturas às quais o material é submetido, menor o valor de módulo dinâmico correspondente, indicando uma maior sensibilidade térmica no comportamento do material a elevadas temperaturas.

Porém, pode-se verificar na Figura 60 que a mistura asfáltica modificada é termicamente mais estável. Enquanto para a mistura de referência, na temperatura de 30 °C e considerando todas as frequências, o módulo dinâmico encontra-se abaixo de 1000 MPa, para a mistura modificada, nestas mesmas condições, observa-se uma menor redução no módulo dinâmico (o qual mantém-se acima de 1000 MPa em todas as variações de frequência e temperatura analisadas).

A fim de auxiliar na compreensão dos dados obtidos, elaborou-se a Tabela 21, que apresenta a perda no módulo dinâmico por grau Celsius (°C) para ambas as misturas estudadas, em cada frequência, quando a temperatura passa de 0 °C para 30 °C (conforme as Figuras 59 e 60).

Tabela 21 - Perda no módulo dinâmico observada para uma amplitude de temperatura de 0 °C a 30 °C, considerando a mistura de referência e a mistura modificada.

Frequência (Hz)	Perda no módulo dinâmico/°C		Diferença entre misturas
	Mistura de Referência	Mistura Modificada	
0,1	547,90	442,50	19,2%
0,2	600,17	476,33	20,6%
0,5	658,03	520,03	21,0%
1	692,10	546,30	21,1%
2	722,53	558,93	22,6%
5	755,17	546,13	27,7%
10	774,07	550,73	28,9%
15	783,13	561,77	28,3%
20	814,50	570,13	30,0%
Média	724,96	541,30	25,0%

Fonte: Elaboração própria, (2020).

A partir da Tabela 21, foi possível inferir que a mistura modificada apresenta uma variação média no módulo dinâmico 25% menor que a mistura de referência, considerando uma amplitude térmica de 0 °C a 30 °C e todas as frequências de carregamento. Ademais, essa diferença apresenta crescimento gradual, à medida em que maiores frequências de carregamento são aplicadas (partindo de 19% para uma frequência de 0,1 Hz e atingindo 30% quando em uma frequência de carregamento de 20 Hz).

Este comportamento está associado à contribuição da fibra metálica presente na mistura modificada, que – por ser um material metálico – apresenta uma resposta elástica mais imediata. Assim, a fibra metálica consegue absorver parte das tensões devido ao carregamento aplicado, reduzindo seu efeito na mistura asfáltica e fazendo com que a perda de módulo dinâmico da mistura modificada seja menor, mesmo em temperaturas e frequências mais elevadas. Neste sentido, há também a contribuição do NTC, que quando adequadamente disperso no ligante asfáltico contribui no aumento da componente elástica e na rigidez da mistura, resultando em uma menor sensibilidade a elevadas temperaturas (Santagata *et al.*, 2012; Latifi e Hayati, 2018).

Por sua vez, o espaço de Black apresenta a correlação entre o módulo dinâmico e o ângulo de fase. De modo geral, observa-se que com o aumento da temperatura têm-se maiores valores de ângulo de fase. Previamente à apresentação gráfica dos resultados obtidos para a mistura de referência e modificada, é

apresentada a Tabela 22, que sintetiza a variação do ângulo de fase nas diferentes frequências e temperaturas ensaiadas.

Tabela 22 - Variação do ângulo de fase medido em função da temperatura (°C), para o espectro de frequências ensaiado. Valores relativos à mistura de referência e modificada.

Frequências (Hz)		0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	15	20
Temperatura (°C)	Mistura	Ângulos de Fase Medidos								
0	Referência	9,9	8,6	7,0	6,1	5,3	4,3	3,6	3,0	2,3
	Modificada	11,2	9,9	8,2	7,1	6,3	5,8	5,0	4,4	4,0
5	Referência	16,5	14,7	12,1	10,5	9,3	7,7	6,6	5,8	4,5
	Modificada	16,6	14,7	12,4	10,9	9,7	8,2	7,1	6,0	5,2
10	Referência	24,1	21,7	18,8	16,4	14,4	12,2	10,6	9,9	7,4
	Modificada	24,3	21,9	18,6	16,5	14,6	12,5	11,0	10,2	9,3
15	Referência	34,5	31,6	27,7	24,8	22,1	18,8	16,7	15,5	14,0
	Modificada	31,9	29,3	25,9	23,0	20,5	17,9	16,0	14,9	14,0
20	Referência	42,0	40,0	36,2	33,0	29,8	25,7	23,2	21,9	21,2
	Modificada	38,4	36,2	32,6	29,8	26,9	23,5	21,1	19,9	18,3
25	Referência	45,2	45,2	43,3	41,0	37,9	33,6	30,5	28,9	28,3
	Modificada	43,3	42,0	39,0	36,3	33,3	29,6	27,1	25,6	23,9
30	Referência	44,2	47,2	49,0	49,2	48,1	45,1	42,6	41,8	41,7
	Modificada	46,1	46,2	45,3	43,8	41,4	38,2	35,5	34,3	33,9

Observação: os valores destacados em negrito correspondem àqueles onde foram observados os maiores valores de ângulo de fase, confrontando a mistura de referência à mistura modificada.

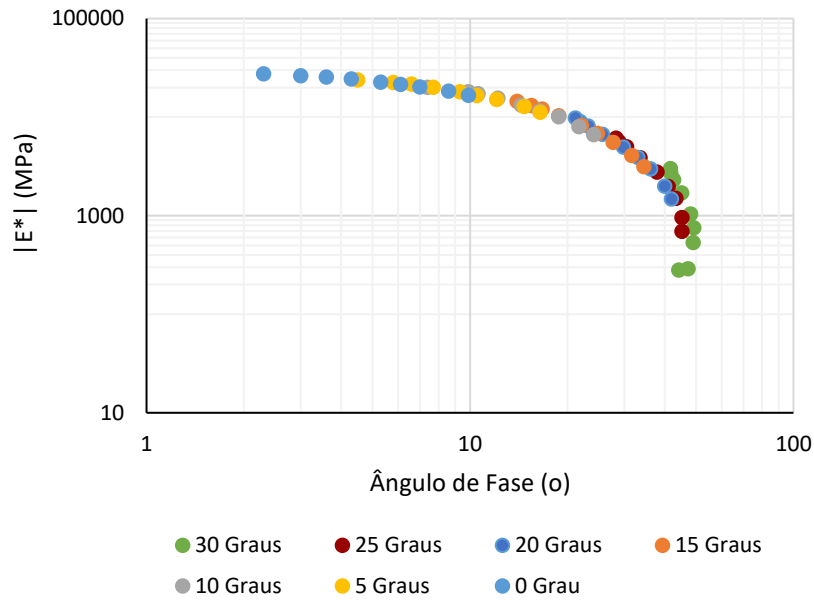
Fonte: Elaboração própria, (2020).

Conforme a Tabela 22, para menores temperaturas (de 0 °C a 10 °C), os maiores valores de ângulo de fase são observados para a mistura modificada (embora a variação média não ultrapasse 10% dos valores obtidos para a mistura de referência). Entretanto, com o aumento da temperatura (a partir de 15 °C até 30 °C), foi verificada a inversão neste comportamento, na qual a mistura de referência passa a apresentar maiores valores de ângulo de fase.

Uma vez que a mistura modificada possui a contribuição da rede elástica formada pelas incorporações (fibra de lã de aço e NTC), o aumento da temperatura faz com que sua resposta à tensão seja mais imediata, resultando em uma mistura com menor valor de ângulo de fase. Na mistura sem incorporações, por sua vez, o aumento do ângulo de fase indica o aumento da sua parcela viscosa. As Figuras 61 e

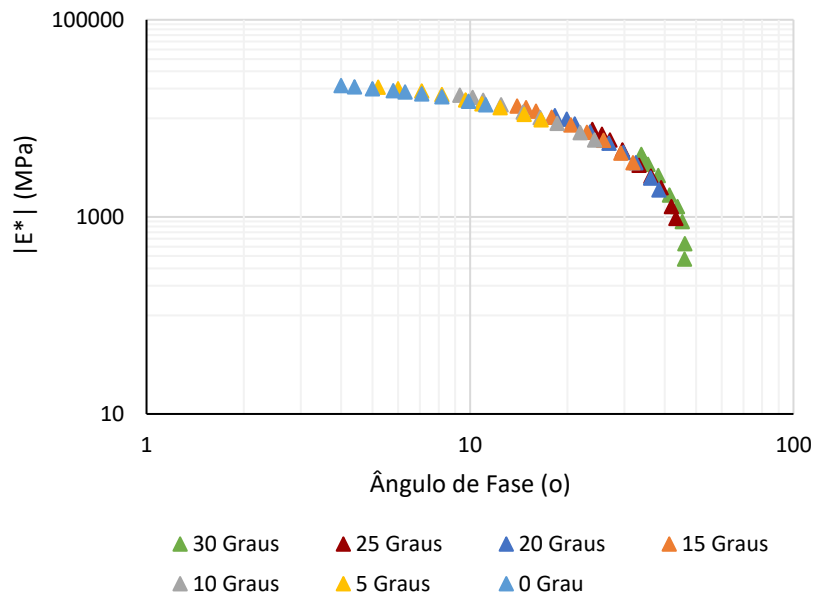
62 apresentam os resultados de espaço de Black obtidos para a mistura de referência e modificada, respectivamente.

Figura 61 - Espaço de Black relativo à mistura de referência.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Figura 62 - Espaço de Black relativo à mistura modificada.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Em síntese, os resultados obtidos na análise das curvas mestras, curvas isócronas, curvas isotérmicas e do espaço de Black para ambas as misturas indicam

que a incorporação das fibras de lã de aço e dos nanotubos de carbono potencializou o desempenho da mistura modificada nas temperaturas acima de 10 °C, fator relacionado a um melhor desempenho quanto à deformação permanente. O aumento na componente elástica e a diminuição do ângulo de fase sob maiores temperaturas indica que a mistura modificada apresenta menor suscetibilidade à deformação plástica quando solicitada a elevadas temperaturas e menores frequências. Este fator é melhor observado na relação E1 (módulo de armazenamento) *versus* E2 (módulo de perda) através do plano Cole – Cole apresentado na sequência deste trabalho.

Estes aspectos complementam o comportamento obtido na análise da deformação permanente de ambas as misturas estudadas neste trabalho. Mesmo que a mistura de referência tenha apresentado comportamento satisfatório (1,8% menor que o limite normatizado de 10%), a mistura modificada (usinada no mesmo teor de ligante asfáltico da mistura de referência) permitiu uma redução de cerca de 35% no afundamento medido ao final de 30.000 ciclos de carregamento devido à contribuição na rede elástica de alto módulo formada através da incorporação da fibra de lã de aço e do NTC.

Cabe observar que o desempenho superior verificado para a mistura modificada no comportamento reológico, ocorreu mesmo com um volume de vazios 30% superior em comparação à mistura de referência (V_v de 5,26% para o corpo de prova da M_{Ref} e 6,72% da M_{Modif}). De modo geral, o aumento no volume de vazios tende a reduzir a rigidez da mistura (Harvey *et al.*, 1995; Zeiada *et al.*; 2013 e Ma *et al.*, 2016) tornando-a mais suscetível ao carregamento. Todavia, este comportamento não foi observado para a mistura modificada, que – pela contribuição da lã de aço e do NTC – apresentou maior valor de módulo dinâmico nas temperaturas mais altas (a partir de 15 °C e menor valor de ângulo de fase), mostrando-se mais rígida nesta faixa de temperatura (15 °C a 30 °C).

Por fim, o módulo dinâmico também pode ser caracterizado pelo plano Cole-Cole (ou espaço Cole-Cole) que tem forma semelhante a um arco de círculo e é representado pela parte real (E1), no eixo das abcissas, e a parte imaginária (E2), no eixo das ordenadas. A parcela real (E1) permite avaliar a parte recuperável da energia armazenada, enquanto a parcela imaginária (E2) associa-se ao comportamento

viscoso irreversível do material (relativo à dissipação de energia) (MANGIAFICO, 2014).

As Tabelas 23 e 24 sintetizam os valores obtidos para o módulo de perda (E2) e módulo de armazenamento (E1), no espectro de frequências e temperaturas estudado, para a mistura de referência.

Tabela 23 - Valores de módulo de perda – E2 (MPa) obtidos para a mistura de referência, nas diferentes temperaturas e frequências estudadas.

Frequência	T=0 °C	T=5 °C	T=10 °C	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	T=30 °C
0,1 Hz	2874,31	3180,97	2718,26	1779,08	980,28	491,02	195,90
0,2 Hz	2735,60	3265,36	2952,06	2136,81	1278,50	677,64	212,05
0,5 Hz	2470,66	3163,14	3259,07	2583,13	1765,32	1025,30	401,51
1 Hz	2286,59	3018,00	3270,64	2864,86	2131,72	1298,34	571,53
2 Hz	2098,20	2911,94	3294,15	3094,82	2472,94	1695,43	773,34
5 Hz	1826,33	2697,28	3285,26	3329,97	2898,14	2144,95	1206,30
10 Hz	1603,61	2494,94	3176,29	3466,72	3203,54	2540,74	1568,32
15 Hz	1371,67	2276,80	3120,51	3494,94	3362,11	2717,98	1809,64
20 Hz	1101,18	1876,66	2588,28	3497,71	3533,07	2900,95	1998,35

Fonte: Elaboração própria, (2020).

Tabela 24 - Valores de módulo de armazenamento – E1 (MPa) obtidos para a mistura de referência, nas diferentes temperaturas e frequências estudadas.

Frequência	T=0 °C	T=5 °C	T=10 °C	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	T=30 °C
0,1 Hz	16469,06	10738,78	6076,74	2588,58	1088,71	487,61	201,45
0,2 Hz	18088,31	12446,80	7418,19	3473,34	1523,66	672,93	196,36
0,5 Hz	20121,89	14754,75	9573,46	4920,13	2412,00	1088,02	349,02
1 Hz	21396,16	16283,68	11112,69	6200,12	3282,56	1493,57	493,33
2 Hz	22617,89	17782,15	12829,85	7621,62	4318,00	2177,87	693,88
5 Hz	24289,44	19949,48	15194,91	9781,73	6021,90	3228,40	1202,10
10 Hz	25488,60	21563,14	16972,34	11555,17	7474,41	4313,32	1705,54
15 Hz	26173,08	22414,66	17879,73	12602,36	8363,52	4923,61	2023,97
20 Hz	27416,90	23845,27	19928,62	14028,54	9108,80	5387,64	2242,90

Fonte: Elaboração própria, (2020).

As Tabelas 25 e 26 apresentam os valores obtidos para o módulo de perda (E2) e módulo de armazenamento (E1) da mistura modificada, respectivamente.

Tabela 25 - Valores de módulo de perda – E2 (MPa) obtidos para a mistura modificada, nas diferentes temperaturas e frequências estudadas.

Frequência	T = 0 °C	T = 5 °C	T = 10 °C	T = 15 °C	T = 20 °C	T = 25 °C	T = 30 °C
0,1 Hz	2650,91	2743,47	2469,09	1869,09	1166,52	661,13	268,77
0,2 Hz	2548,68	2773,07	2655,67	2172,37	1453,48	849,13	385,42
0,5 Hz	2352,52	2739,16	2825,02	2605,52	1902,94	1237,24	634,74
1 Hz	2182,31	2648,09	2875,37	2800,37	2223,46	1528,58	876,95
2 Hz	2022,18	2583,45	2905,35	3000,23	2522,32	1832,64	1097,78
5 Hz	1919,97	2478,46	2951,80	3139,65	2890,53	2348,69	1617,14
10 Hz	1737,28	2330,63	2909,65	3254,73	3148,53	2729,63	1980,78
15 Hz	1594,45	2080,64	2882,59	3301,59	3338,78	2972,75	2214,66
20 Hz	1493,56	1876,82	2771,67	3222,88	3343,39	3127,69	2402,21

Fonte: Elaboração própria, (2020).

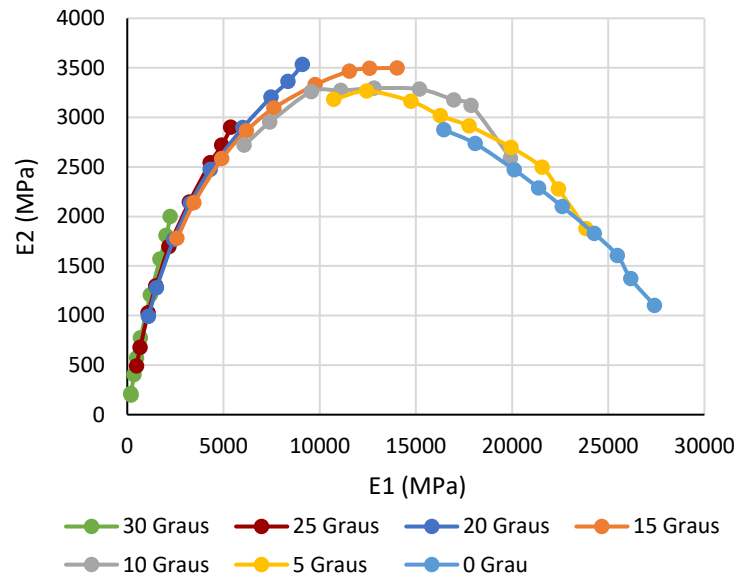
Tabela 26 - Valores de módulo de armazenamento – E1 (MPa) obtidos para a mistura modificada, nas diferentes temperaturas e frequências estudadas.

Frequência	T = 0 °C	T = 5 °C	T = 10 °C	T = 15 °C	T = 20 °C	T = 25 °C	T = 30 °C
0,1 Hz	13388,08	9202,77	5468,42	3002,81	1471,78	701,57	258,64
0,2 Hz	14603,26	10570,30	6606,19	3871,12	1985,93	943,05	369,60
0,5 Hz	16325,37	12458,43	8394,38	5365,86	2975,54	1527,87	628,13
1 Hz	17520,61	13751,35	9707,09	6597,26	3882,38	2080,91	914,47
2 Hz	18316,71	15113,79	11153,82	8024,47	4971,77	2789,92	1245,18
5 Hz	18901,74	17199,34	13314,72	9720,54	6647,77	4134,45	2055,02
10 Hz	19857,15	18711,41	14968,83	11350,58	8159,61	5334,16	2776,95
15 Hz	20721,75	19795,96	16020,74	12408,27	9223,29	6204,61	3246,57
20 Hz	21358,84	20622,77	16925,56	12926,28	10109,48	7058,04	3574,86

Fonte: Elaboração própria, (2020).

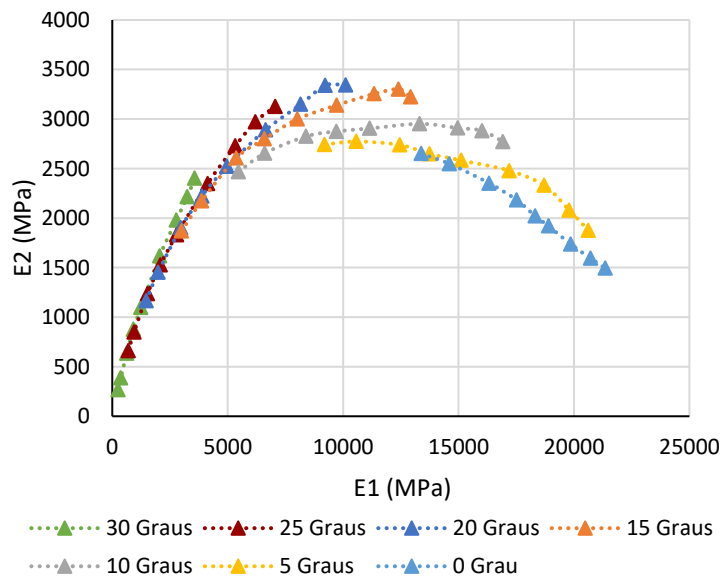
As Figuras 63 e 64 representam graficamente os resultados sintetizados nas tabelas acima, relacionando as parcelas reais e imaginárias do módulo para a mistura de referência e modificada através do plano Cole-Cole.

Figura 63 - Plano Cole-Cole obtido para a mistura asfáltica de referência.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Figura 64 - Plano Cole-Cole obtido para a mistura asfáltica modificada.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Com base nas Figuras 63 e 64, pode-se observar a temperatura na qual a parcela viscosa apresenta maior magnitude, correspondendo à temperatura em que ocorre a maior perda de energia da mistura quando solicitada. Assumindo a frequência de carregamento de 10 Hz (empregada nos ensaios de fadiga), observa-se que esta temperatura corresponde a 15 °C (para ambas as misturas). Entretanto, os ensaios de fadiga foram conduzidos a 20 °C, por se tratar de um valor mais usual para este tipo de ensaio.

Outro aspecto importante acerca da representação do plano Cole-Cole é que, a partir deste, faz-se possível extrair os parâmetros reológicos para o modelo de Huet-Sayegh. Assim, extraídos os parâmetros reológicos apresentados na Tabela 27, ao aplicá-los na equação do modelo de Huet-Sayegh (Equação 13, Subitem 3.4.2), é obtido o módulo dinâmico para qualquer temperatura e frequência.

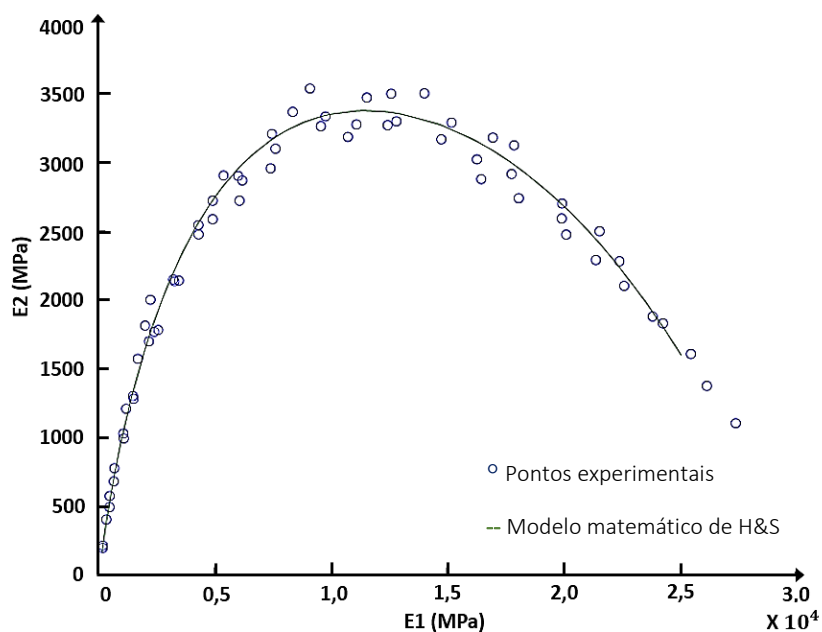
Tabela 27 - Parâmetros obtidos com o software Viscanalise, referentes ao modelo Huet-Sayegh, contemplando a mistura de referência e a mistura modificada.

Parâmetro do Modelo (Huet-Sayegh)	Mistura de Referência	Mistura Modificada
E_0	55,69	21,12
E_∞	29828,30	26750,90
δ	2,42	1,76
k	0,24	0,22
h	0,65	0,58
τ	0,02	0,03
A_0	5,47	4,15
A_1	-0,55	-0,44
A_2	0,00	0,00

Fonte: Elaboração própria, (2020).

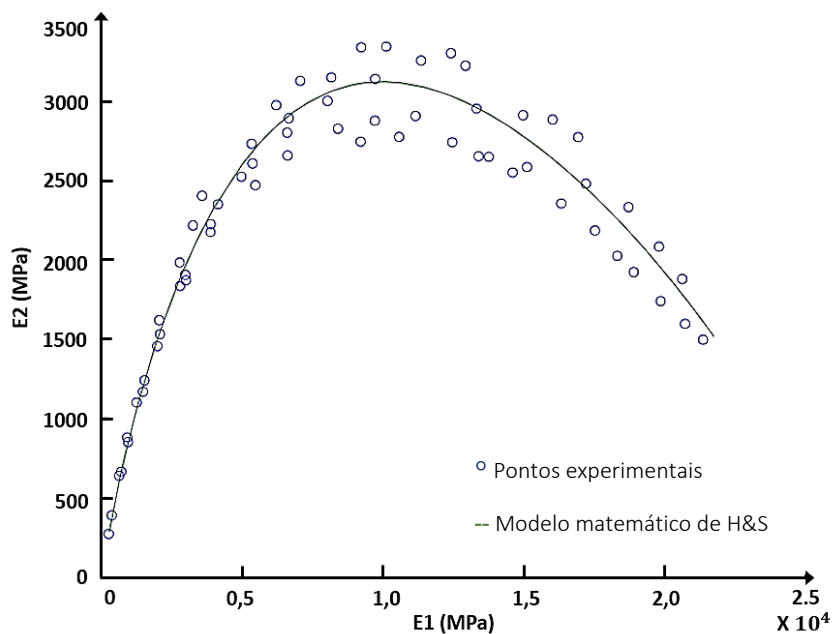
Os valores apresentados na Tabela 27, relativos à mistura de referência e modificada foram ajustados aos dados experimentais (calagem), visando obter um maior refinamento e, conseqüentemente, uma maior fidelidade na representação do modelo matemático aos dados obtidos em laboratório. As Figuras 65 e 66 apresentam este resultado para a mistura de referência e modificada, respectivamente.

Figura 65 - Calagem do modelo Huet-Sayegh aos dados experimentais relativos à mistura de referência.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Figura 66 - Calagem do modelo Huet-Sayegh aos dados experimentais relativos à mistura modificada.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

4.5 ETAPA 5 – AVALIAÇÃO DA REPARAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

As seções a seguir tratam da apresentação dos resultados referentes ao comportamento à fadiga (final da Etapa 4) e à capacidade de regeneração das misturas asfálticas desenvolvidas (Etapa 5). Optou-se por apresentá-los na sequência, uma vez que a avaliação da capacidade regenerativa de ambas as misturas está apoiada na recuperação do módulo dinâmico e no aumento do número de ciclos alcançados para os corpos de prova após a execução do ensaio de fadiga (original).

Previamente à discussão, são abordados alguns aspectos de influência nos resultados obtidos para fadiga e reparação das misturas estudadas, são eles: o aspecto superficial dos corpos de prova da mistura contendo lã de aço e a obtenção da taxa de aquecimento das misturas asfálticas.

4.5.1 Aspecto superficial dos corpos de prova contendo lã de aço

A fim de verificar a dispersão e a suscetibilidade à oxidação das fibras no interior da mistura asfáltica compactada, foi analisada a superfície de um corpo de prova de dimensões 5,08 x 6,35 x 38,1 cm (extraído de uma placa de 60 x 40 x 9 cm) e previamente utilizado nos ensaios de fadiga e reparação. A análise superficial foi realizada através de microscopias com aproximação de 1.000 vezes. Ressalta-se que o tempo entre a moldagem da placa e a verificação da dispersão/oxidação das fibras foi de aproximadamente 5 meses. Na Figura 67 é apresentada a superfície da qual foram extraídas imagens.

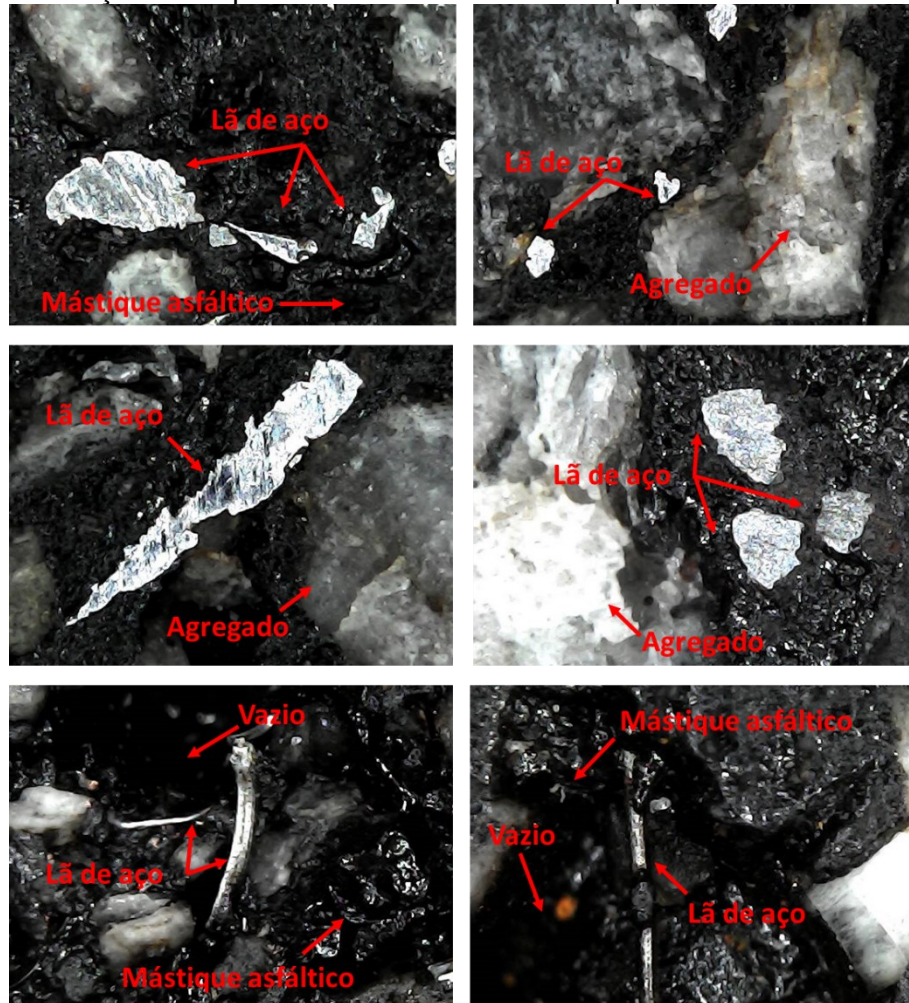
Figura 67 - Superfície do um corpo de prova (5,08 x 6,35 x 38,1 cm) utilizado na análise microscópica da distribuição das fibras metálicas.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

É importante frisar que, embora as microscopias apresentadas a seguir correspondam à região da superfície da amostra de concreto asfáltico observada na Figura 67, ao longo da análise microscópica procedeu-se a varredura superficial de todas as faces constituintes da vigota. Uma vez que a região selecionada se mostrou representativa do resultado global verificado, optou-se por apresentar na Figura 68 apenas as micrografias relativas a esta.

Figura 68 - Aspecto superficial do corpo de prova prismático relativo à M_{Modif} , bem como da verificação da dispersão das fibras metálicas após o corte da amostra.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Em relação à distribuição das fibras de lã de aço na mistura asfáltica, observa-se na microscopia apresentada na Figura 68 (com aproximação de 1.000 vezes), que as mesmas se encontram bem distribuídas ao longo da amostra. Deve-se observar também que a dimensão das fibras permitiu que as mesmas se incorporassem na interface ligante/agregado. Além disto, percebe-se que o material metálico se encontra completamente recoberto pelo ligante asfáltico (com exceção das duas últimas micrografias, nas quais a fibra perpassa um vazio), demonstrando boa adesão entre os materiais (aspecto discutido no desempenho reológico e à fadiga da mistura modificada).

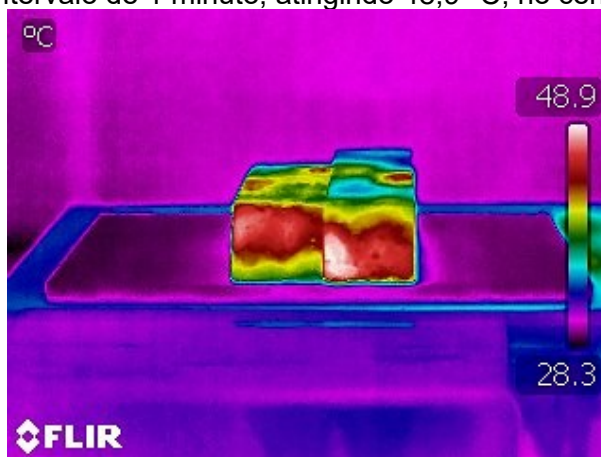
Ademais, não foi observada a formação de grumos nem emaranhados entre as fibras metálicas no interior da mistura asfáltica. Da mesma forma, é pertinente constatar a ausência de oxidação do material metálico. Pode-se inferir que o ligante asfáltico atuou como uma camada protetora da fibra metálica, impedindo a oxidação e/ou processo de corrosão da mesma pelo oxigênio e umidade presentes no ar, os quais seriam suficientes para oxidar a fibra de lã de aço. Um último ponto é que aparentemente a lã não foi degradada devido à temperatura de incorporação na mistura asfáltica, indo ao encontro do resultado de TGA obtido para material.

4.5.2 Obtenção da taxa de aquecimento das misturas

Para garantir que as amostras de referência atingissem 60 °C de temperatura interna máxima após o aquecimento por micro-ondas, foram explorados os intervalos de tempo pré-determinados na metodologia (30, 60 e 90 segundos), buscando obter seu tempo ideal de micro-ondas. Ressalta-se que as amostras, previamente ao aquecimento, passaram por um período de 24 horas de condicionamento a 20 °C no interior da câmara climatizada.

A Figura 69 apresenta, a título de exemplo, um dos resultados obtidos na avaliação da temperatura. Foi possível observar, através da análise termográfica de um corpo de prova relativo à mistura de referência, que – após o aquecimento em forno micro-ondas durante o intervalo de 1 minuto – alcançou-se uma temperatura interna máxima de 48,9 °C, no centro do corpo de prova.

Figura 69 - Temperatura interna máxima obtida para amostra da mistura de referência, aquecida durante o intervalo de 1 minuto, atingindo 48,9 °C, no centro do corpo de prova.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

A Tabela 28 apresenta os demais resultados da análise, tanto para a mistura de referência, quanto para a mistura modificada (16% de fibra de lã de aço e 1% de NTC). Cabe ressaltar que, para cada intervalo de tempo estabelecido, as amostras foram avaliadas em duplicata.

Tabela 28 - Acréscimo da temperatura interna máxima das amostras relativas à mistura de referência e modificada, com o aumento do tempo de aquecimento no micro-ondas.

Tempo de micro-ondas (s)	Mistura de Referência		Mistura Modificada	
	Temperatura (°C)	Temp. Média (°C)	Temperatura (°C)	Temp. Média (°C)
0	20	20	20	20
0	20		20	
30 (30")	35,5	38	60,6	61,1
30 (30")	40,4		61,5	
60 (1')	48,9	49,7	72,4	72,9
60 (1')	50,5		73,3	
90 (1' 30")	55,1	59,7	97,7	95,3
90 (1' 30")	64,3		92,9	

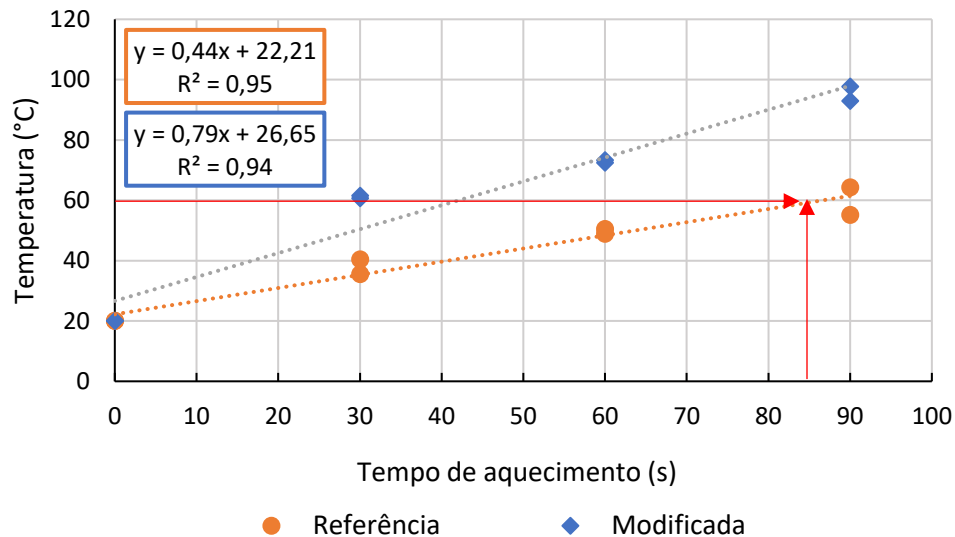
Fonte: Elaboração própria, (2020).

É observado, na Tabela 28, o acréscimo da temperatura com o aumento do tempo de micro-ondas para ambas as misturas, sendo este superior para a mistura contendo fibras de lã de aço e nanotubos de carbono. Este aspecto corrobora com a avaliação prévia obtida para a mistura asfáltica fina, onde foi observada a redução da resistência elétrica e o incremento da condutividade térmica nas amostras contendo as incorporações, efeito validado na avaliação do aquecimento por micro-ondas. A taxa de aquecimento interno média correspondeu a 0,44 °C/s e 0,79 °C/s para a mistura de referência e modificada, respectivamente. Os valores obtidos demonstram que a taxa de aquecimento da mistura modificada é aproximadamente 80% maior, embora ambos se encontrem próximos àqueles alcançados por Liu *et al.* (2011, 2017); Zhao *et al.* (2017).

O gráfico da Figura 70 sintetiza o comportamento obtido na Tabela 28. São plotadas as temperaturas máximas alcançadas internamente pelas amostras de ambas as misturas em função dos intervalos de tempo nos quais as mesmas foram aquecidas. É apresentado também, através de uma equação de correlação, o tempo de aquecimento necessário para que seja atingida a temperatura interna máxima alvo de 60 °C para a mistura de referência. Outro aspecto a ser observado consiste no prolongamento do gráfico até o tempo zero. Nesta situação, a temperatura das

amostras atinge 20 °C, que corresponde à temperatura na qual estas foram condicionadas anteriormente ao ensaio.

Figura 70 - Comparativo entre o aquecimento da face interna das amostras de concreto asfáltico da mistura de referência e modificada, para diferentes tempos de aquecimento em micro-ondas.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Conforme a Figura 70, o intervalo correspondente à temperatura interna máxima de 60 °C para a mistura de referência foi de 86 segundos. Uma vez que o objetivo da incorporação de materiais condutivos (lã de aço e nanotubos de carbono) foi potencializar a capacidade de aquecimento das amostras para um mesmo intervalo de tempo que a mistura de referência, o mesmo tempo de aquecimento foi assumido para a mistura modificada (ou seja, 86 segundos de aquecimento em forno de micro-ondas). Neste caso, a mistura modificada atinge uma temperatura interna máxima de aproximadamente 94 °C (conforme equação de correlação). Entretanto, observa-se que as duas temperaturas se encontram inseridas no intervalo de estudo determinado na metodologia (58 - 110 °C).

Ressalta-se que não foram observadas deformações, tampouco mudanças no volume das amostras aquecidas após 86 segundos no interior do forno micro-ondas, aspecto relevante sobretudo para a mistura modificada, que apresenta temperatura interna máxima cerca de 34 °C superior à mistura de referência (ou seja, 94 °C).

Por fim, a partir da definição do tempo de aquecimento (86 s), e com a potência do micro-ondas (W) e o volume do corpo de prova prismático (m³), foi

calculada a energia total ($J = Ws$) e a densidade de energia (J/m^3) envolvida no procedimento (método de aquecimento), cujos valores são, respectivamente, 77.400 J e 62.976.503,91 J/m^3 .

4.5.3 Fadiga das misturas asfálticas e capacidade de reparação

Com o objetivo de avaliar o desempenho à fadiga e à reparação das misturas asfálticas estudadas, foram analisados 13 corpos de prova relativos à mistura de referência e 13 corpos de prova referentes à mistura modificada, extraídos de placas de dimensão 60 x 40 x 9 cm. Previamente à discussão dos resultados obtidos, são apresentados, na Tabela 29, os volumes de vazios dos corpos de prova de ambas as misturas.

Tabela 29 – Volume de vazios obtido após a triagem das amostras da mistura de referência e modificada, respectivamente.

Mistura de Referência		Mistura Modificada	
Amostra	Vv (%)	Amostra	Vv (%)
01	5,26	01	6,89
02	6,32	02	8,24
03	6,06	03	6,84
04	5,52	04	7,42
05	5,90	05	7,68
06	7,73	06	7,34
07	8,46	07	7,23
08	8,81	08	7,30
09	8,50	09	7,06
10	7,02	10	7,20
11	7,56	11	6,74
12	7,12	12	7,33
13	7,47	13	6,72
Média	7,06	Média	7,18
Desvio Padrão	1,17	Desvio Padrão	0,43

Fonte: Elaboração própria, (2020).

Observa-se, pela Tabela 29, que a mistura modificada resultou em corpos de prova com volume de vazios médio ligeiramente maior que a mistura de referência, caracterizando uma maior proximidade quando comparado às placas de deformação

permanente. Isto porque, para a fadiga, de uma placa com dimensão de 60 x 40 x 9 cm são extraídas apenas cinco vigotas da região de maior homogeneidade na compactação; fator responsável por esta redução na variação no volume de vazios entre misturas (referência e modificada).

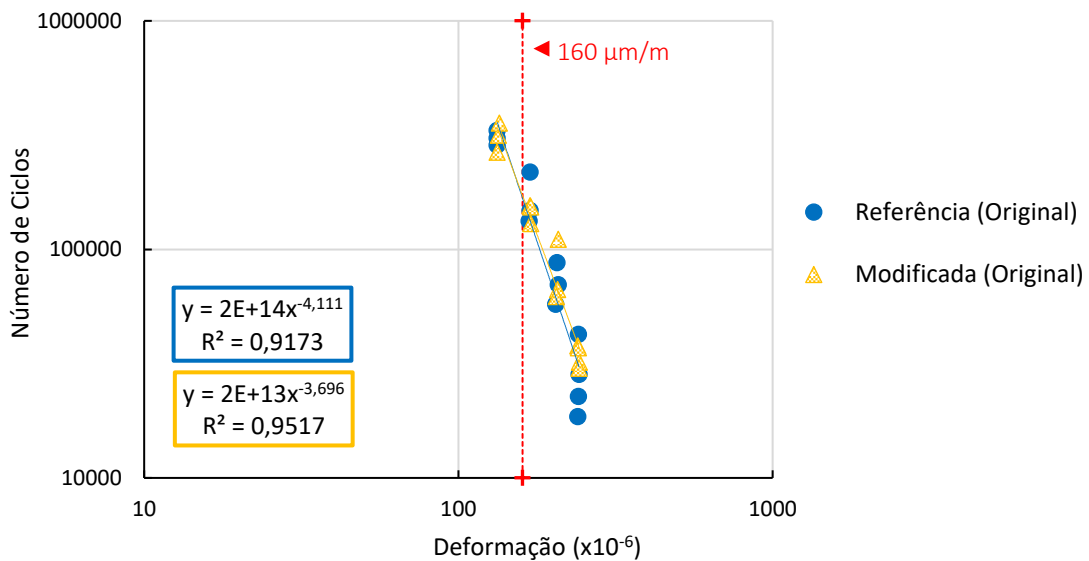
Após a discussão do volume de vazios das amostras, são apresentados os resultados de fadiga originais (sem reparação) relativos à mistura de referência e à mistura modificada. Ressalta-se que os ensaios foram realizados à temperatura de 20 °C e a frequência utilizada correspondeu a 10 Hz, equivalente à velocidade de tráfego de 72 km/h (Chabot *et al.*, 2006). Como critério de ruptura, utilizou-se a redução de 50% do módulo dinâmico lido no 100º ciclo de carregamento. A Tabela 30 sintetiza estes resultados, que são apresentados graficamente através da Figura 71.

Tabela 30 - Resultados obtidos no ensaio de fadiga para a mistura de referência e à mistura modificada, respectivamente.

Mistura de Referência		Mistura Modificada	
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	Nº ciclos	ϵ ($\mu\text{m/m}$)	Nº ciclos
133	286.165	133	266.220
133	330.932	134	315.567
133	306.527	135	356.727
169	218.185	169	155.293
168	133.052	170	129.534
169	147.983	170	153.140
206	87.404	207	66.694
208	69.922	205	62.068
204	57.449	208	110.669
242	28.400	243	32.096
241	22.687	240	37.776
240	18.561	242	30.148
241	42.460	241	37.083

Fonte: Elaboração própria, (2020).

Figura 71 - Comparativo entre curvas de fadiga originais para a mistura de referência e modificada.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Observa-se que ambas as curvas de fadiga apresentam um comportamento bastante semelhante, apresentando-se sobrepostas no nível de deformação de 160 μm/m. A partir deste valor, as curvas passam a apresentar um leve distanciamento, resultado da variação de inclinação observada (mistura de referência: 4,11 e mistura modificada: 3,69). Este distanciamento é traduzido em uma menor sensibilidade da mistura modificada a maiores valores de microdeformação.

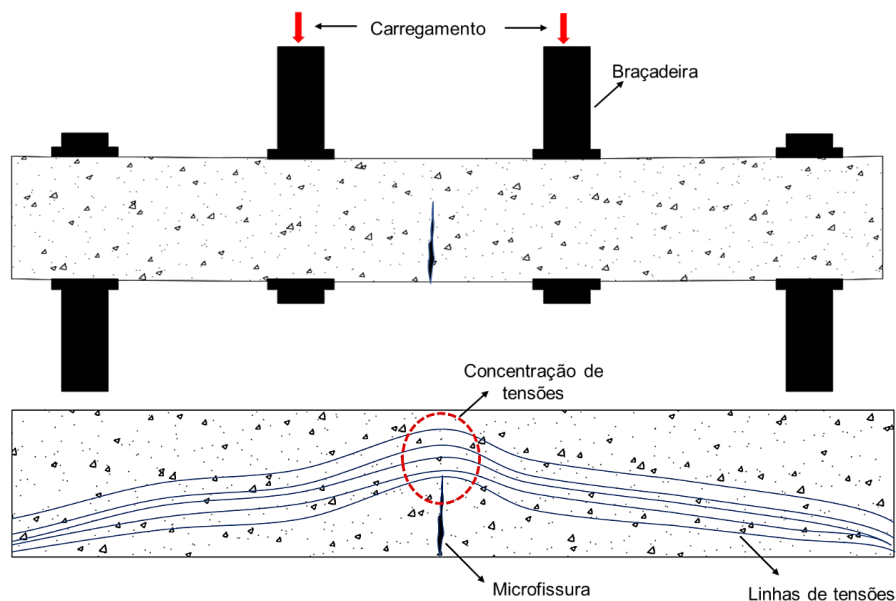
É interessante observar que a proximidade no comportamento à fadiga da mistura de referência e da mistura modificada ocorre mesmo que esta última possua menos ligante asfáltico disponível, fator que ocasiona redução no desempenho à fadiga do material (Sousa *et al.*, 1998; Sugandh *et al.*, 2007). Isto porque, conforme discutido anteriormente, na mistura modificada a presença das fibras metálicas provoca o aumento da área específica da mistura asfáltica, resultando em um menor teor de ligante asfáltico disponível em comparação à mistura de referência (uma vez que ambas possuem teor de 4,65% de ligante asfáltico na dosagem).

Os efeitos negativos da falta de ligante asfáltico são compensados pelo benefício promovido pela incorporação das fibras de lã de aço, aspecto que vem ao encontro de estudos como os de Liu *et al.* (2010, 2011, 2012), Liu (2012), Garcia *et*

al. (2012, 2014), Franesqui *et al.* (2017), Pamulapati *et al.* (2017), nos quais a aplicação de fibras de lã de aço é direcionada a misturas com a finalidade de reparação, inclusive em misturas com volume de vazios superior (como é o caso de misturas porosas).

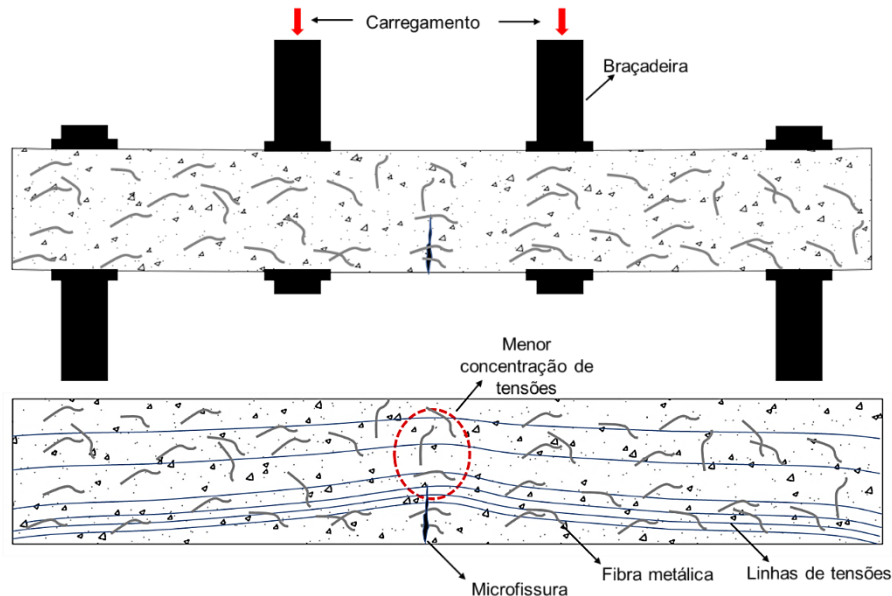
Neste contexto, o desempenho da mistura modificada em comparação à mistura de referência, sem a aplicação do protocolo de reparação, pode ser explicado a partir das Figuras 72 e 73. Cabe ressaltar que ambas as figuras têm um viés ilustrativo, e, portanto, os elementos representados (fibras metálicas, fissuras, braçadeiras, entre outros) não seguem uma escala de representação gráfica, buscando apenas auxiliar na compreensão do fenômeno.

Figura 72 - Representação do desenvolvimento de microfissuras no interior da mistura de referência, devido aos ciclos de carregamento.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Figura 73 - Representação do desenvolvimento de microfissuras no interior da mistura modificada, devido aos ciclos de carregamento, e do feito dissipador produzido pela lã de aço.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Na Figura 72, relativa à mistura de referência, observa-se que durante o ensaio de fadiga, o carregamento cíclico produz tensões na amostra. O acúmulo destas tensões resulta na nucleação e crescimento de microfissuras na amostra de concreto asfáltico. Com o aumento dos ciclos de carregamento, ocorre um aumento na dimensão das fissuras e – consequentemente – um maior acúmulo de tensões na região fissurada. Não havendo a rigidez imposta pelas fibras metálicas, menor é o número de ciclos de carregamento necessários para reduzir a vida de fadiga da mistura.

Por outro lado, quando avaliada a mistura modificada com a incorporação do NTC e das fibras de lã de aço distribuídas ao longo da amostra (Figura 73), para que as tensões devido ao carregamento cíclico provoquem a nucleação e o crescimento de microfissuras na amostra, faz-se necessário que estas ultrapassem a barreira rígida formada pela lã de aço e seu respectivo efeito de “ancoragem” ao longo da amostra, aspecto também observado no estudo de Wu *et al.* (2007), Figueiredo (2010) e Liu (2012).

Ocorre então uma melhora no desempenho do material, na qual a lã de aço intercepta as microfissuras produzidas pelo carregamento, evitando e/ou retardando sua propagação. Aspecto semelhante é observado por Garcez (2006) no estudo de concreto de cimento Portland reforçado com fibras de aço. Esta condição faz com que os efeitos da menor quantidade de ligante disponível na mistura modificada (fator que compromete o desempenho à fadiga) sejam minimizados devido ao incremento na vida de fadiga produzido pelas fibras metálicas.

Uma vez compreendido o efeito das fibras metálicas e dos nanotubos de carbono no comportamento à fadiga das misturas estudadas, são apresentados os resultados referentes à reparação. As Tabelas 31 e 32 auxiliam no entendimento do comportamento das misturas sob dois aspectos, um deles anterior à reparação (chamado de análise “original”) e o outro após o reparo (intitulada análise “reparada”).

Assim, primeiramente são apresentados resultados obtidos para análise original, como: nível de deformação aplicada pelo equipamento, módulo dinâmico inicial (100º ciclo), módulo dinâmico ao atingir o critério de paralização (50% do módulo dinâmico inicial) e o número de ciclos de carregamento suportado pelo corpo de prova.

A parcela relativa à análise reparada contempla: valores de módulo dinâmico inicial (100º ciclo) dos corpos de prova posteriormente ao processo de reparação (86 segundos de micro-ondas e 3 horas de repouso), critério de paralização (ou seja, 50% do módulo dinâmico inicial da análise original) bem como o número de ciclos após a reparação para atingi-lo (sobrevida) e, por fim, a porcentagem de ajuste do critério de paralização (melhor detalhada a seguir).

Tabela 31 - Avaliação da mistura de referência quanto ao módulo dinâmico e número de ciclos "originais", bem como o valor de módulo dinâmico e número de ciclos "reparados" até atingir novamente o critério de reparação.

Original				Após reparação ↓	Reparada			
ε ($\mu\text{m/m}$)	E* Inicial (MPa)	E* 50% (MPa)	nº ciclos		E* Inicial (MPa)	E* 50% (MPa) [Original]	Ajuste (%)	nº ciclos [Sobrevida]
133	6905	3453	286.165		5633	3453	61,30	73.361
133	7118	3559	330.932		5766	3559	61,72	138.678
133	6797	3399	306.527		5248	3399	64,77	47.218
169	7065	3533	218.185		6006	3533	58,82	72.518
168	7310	3655	133.052		6222	3655	58,74	20.489
169	6108	3054	147.983		5272	3054	57,93	39.332
206	5807	2904	87.404		5568	2904	52,16	23.656
208	5565	2782	69.922		5249	2782	53,00	24.058
204	6504	3252	57.449		5164	3252	62,97	25.071
242	5531	2765	28.400		5545	2765	49,86	6.575
241	6259	3129	22.687		4825	3129	64,85	7.792
240	6314	3157	18.561		4835	3157	65,29	7.968
241	5624	2812	42.460		5274	2812	53,32	13.438
Média	6262				5383			
Des. Pad.	612				433			

Fonte: Elaboração própria, (2020).

Tabela 32 - Avaliação da mistura modificada quanto ao módulo dinâmico e número de ciclos "originais" até atingir o critério de paralização, bem como o valor de módulo dinâmico e número de ciclos "reparados" até atingir novamente o critério de reparação.

Original				Após reparação ↓	Reparada			
ε ($\mu\text{m}/\text{m}$)	$ E^* _{\text{Inicial}}$ (MPa)	$ E^* _{50\%}$ (MPa)	nº ciclos		$ E^* _{\text{Inicial}}$ (MPa)	$ E^* _{50\%}$ (MPa) [Original]	Ajuste (%)	nº ciclos [Sobrevida]
133	6951	3476	266.220		6205	3476	56,02	132.860
134	6717	3359	315.567		6437	3359	52,18	122.878
135	6959	3479	356.727		5261	3479	66,13	134.915
169	6221	3110	155.293		5797	3110	53,65	64.244
170	6163	3081	129.534		5116	3081	60,22	47.207
170	6723	3362	153.140		5457	3362	61,61	83.678
207	6436	3218	66.694		4982	3218	64,59	27.083
205	6077	3038	62.068		4981	3038	60,99	25.231
208	6039	3019	110.669		5562	3019	54,28	56.420
243	6293	3146	32.096		5955	3146	52,83	11.839
240	7207	3604	37.776		5915	3604	60,93	16.591
242	6235	3118	30.148		5740	3118	54,32	19.499
241	6329	3164	37.083		5648	3164	56,02	20.324
Média	6426				5492			
Des. Pad.	378				360			

Fonte: Elaboração própria, (2020).

Um detalhe a ser observado – e apresentado nas Tabelas 31 e 32 como “% de ajuste” – diz respeito ao ajuste do critério de paralização dos ensaios. Quando iniciado o ensaio de fadiga referente à reparação, o *software* fornecia o novo valor de módulo dinâmico inicial e (por definição) assumia como critério de parada a redução até 50% deste. Entretanto, o objetivo da análise consistia em avaliar o incremento obtido no número de ciclos em relação ao módulo em que o primeiro ensaio de fadiga foi realizado (análise original). Desta forma, alterava-se manualmente no *software* a porcentagem de redução do módulo dinâmico da segunda etapa de ensaios para que o critério de paralização do segundo ensaio de fadiga fosse coincidente (ou o mais próximo possível) com aquele obtido na primeira etapa.

Além disso, os dados demonstrados nas tabelas 31 e 32 são discutidos frente a dois aspectos principais: a recuperação obtida para o módulo dinâmico e o aumento no número de ciclos de carregamento suportado pelos corpos de prova, ou seja, a sobrevida na fadiga. Quanto à recuperação do módulo dinâmico, com base nas tabelas 31 e 32, foi possível estabelecer o comparativo entre a mistura de referência (original e reparada) e a mistura modificada (original e reparada), em função da

recuperação obtida para o módulo dinâmico após o protocolo de reparação (86 segundos de aquecimento no micro-ondas e 3 horas de repouso).

A Tabela 33 resume este comparativo, representado através do índice de recuperação do módulo dinâmico (I_{MD}) e sua respectiva porcentagem, tanto para a mistura de referência quanto para a mistura modificada.

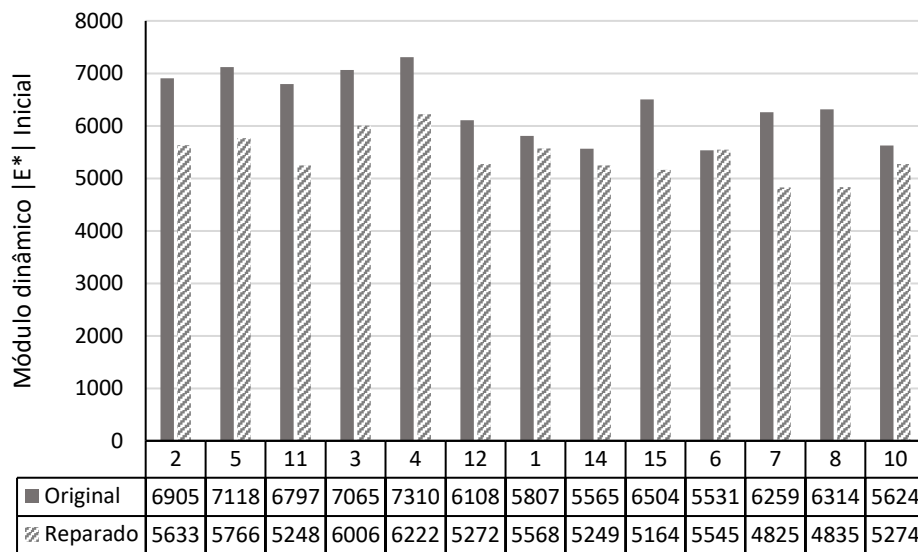
Tabela 33 - Resultados da reparação da mistura de referência e modificada, expressos através do Índice de Recuperação do módulo dinâmico e da porcentagem de recuperação.

Mistura de Referência				Mistura Modificada			
E* inicial (MPa)	E* inicial (MPa)	Recuperação do módulo dinâmico		E* inicial (MPa)	E* inicial (MPa)	Recuperação do módulo dinâmico	
		Índice	%			Índice	%
Original	Reparado			Original	Reparado		
6905	5633	0,82	81,58	6951	6205	0,89	89,27
7118	5766	0,81	81,01	6717	6437	0,96	95,83
6797	5248	0,77	77,21	6959	5261	0,76	75,60
7065	6006	0,85	85,01	6221	5797	0,93	93,18
7310	6222	0,85	85,12	6163	5116	0,83	83,01
6108	5272	0,86	86,31	6723	5457	0,81	81,17
5807	5568	0,96	95,88	6436	4982	0,77	77,41
5565	5249	0,94	94,32	6077	4981	0,82	81,96
6504	5164	0,79	79,40	6039	5562	0,92	92,10
5531	5545	1,00	100,25	6293	5955	0,95	94,63
6259	4825	0,77	77,09	7207	5915	0,82	82,07
6314	4835	0,77	76,58	6235	5740	0,92	92,06
5624	5274	0,94	93,78	6329	5648	0,89	89,24
Média		0,86	85,66	Média		0,87	86,73
Des. Pad.		0,08	7,98	Des. Pad.		0,07	6,81

Fonte: Elaboração própria, (2020).

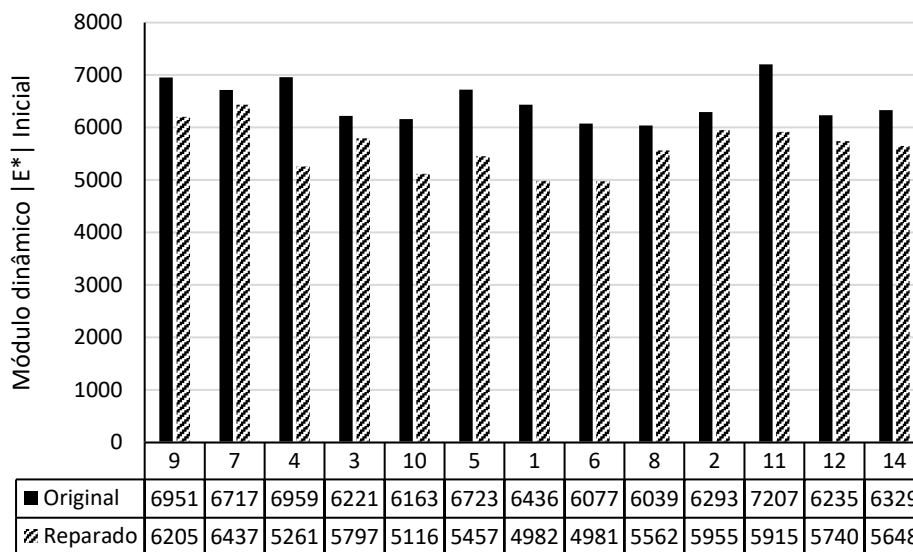
Os dados elencados na Tabela 33 foram traduzidos de forma gráfica, para melhor visualização dos resultados. Desta forma, a Figura 74 trata dos valores de módulo dinâmico dos corpos de prova relativos à mistura de referência (original e reparada), enquanto a Figura 75 apresenta os resultados relativos à mistura modificada (original e reparada).

Figura 74 - Recuperação do módulo dinâmico dos corpos de prova da mistura de referência (identificados no eixo das abscissas) após o processo de reparação.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Figura 75 - Recuperação do módulo dinâmico dos corpos de prova da mistura modificada (identificados no eixo das abscissas) após o processo de reparação.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Através da Figura 74 foi possível observar que, para todos os corpos de prova ensaiados, a reparação ocorreu de forma efetiva, com recuperação média do módulo dinâmico superior a 85% (desvio padrão de 7,98%). Este aspecto confirma a existência de uma característica de regeneração natural dos materiais asfálticos, auxiliada pela indução de calor (que reduz a viscosidade da MAF, permitindo-o fluir

entre as microfissuras geradas pelo carregamento) e pela inserção de períodos de repouso (que permite que as microfissuras selem).

Novamente, ao observar os resultados apresentados na Tabela 33 e na Figura 75, foi verificado o nível de recuperação do módulo dinâmico atingido para a mistura modificada. Com a incorporação das fibras metálicas e do NTC (16% e 1%, respectivamente), foi alcançado um índice médio de recuperação do módulo dinâmico de 0,87 (aproximadamente 87%). O processo de reparação na mistura modificada também ocorreu homoganeamente, apresentando desvio padrão de 6,81%. Ressalta-se que os valores alcançados para recuperação do módulo dinâmico corroboram com o estudo de Liu *et al.* (2017), no qual as amostras ensaiadas apresentaram recuperação da rigidez próxima a 80% utilizando a técnica de termo indução.

É importante notar que a mistura de referência e a mistura modificada atingem praticamente o mesmo nível de recuperação do módulo dinâmico ao final da etapa de reparação. Este fator é um indicativo de que a capacidade de selagem das fissuras pelo ligante asfáltico (devido à temperatura de aquecimento e à aplicação do tempo de repouso) alcança um pico de reparação. A partir deste ponto, a parcela não reparável estaria associada a pequenas alterações estruturais no interior da amostra fadigada (conforme Liu, 2012 [78,8% reparado, técnica de termo indução]; Dai *et al.*, 2013 [73,6% reparado, termo indução]; Garcia *et al.*, 2014 [60% reparado, termo indução]; Ajam *et al.*, 2016 [90% reparado, termo indução]).

Entretanto, a avaliação da capacidade reparadora das misturas asfálticas não está associada apenas à recuperação do módulo dinâmico. É importante investigar a sobrevida das misturas asfálticas nos ensaios de fadiga, após a reparação. Esta abordagem foi representada pelo número de ciclos de carregamento suportados pelos corpos de prova até atingir novamente o critério de paralização do ensaio. A Tabela 34 apresenta o número de ciclos final (fadiga + reparação) e porcentagem de reparação alcançada para cada corpo de prova, tanto para a mistura de referência quanto para a mistura modificada.

Tabela 34 - Porcentagem de reparação obtida para os corpos de prova da mistura de referência e modificada, além da porcentagem média final de reparação para cada mistura.

Mistura de Referência			Mistura Modificada		
ϵ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	nº de ciclos	% reparada	ϵ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	nº de ciclos	% reparada
133	359.526	26	133	399.080	50
133	469.610	42	134	438.445	39
133	353.745	15	135	491.642	38
169	290.703	33	169	219.537	41
168	153.541	15	170	176.741	36
169	187.315	27	170	236.818	55
206	111.060	27	207	93.777	41
208	93.980	34	205	87.299	41
204	82.520	44	208	167.089	51
242	34.975	23	243	43.935	37
241	30.479	34	240	54.367	44
240	26.529	43	242	49.647	65
241	55.898	32	241	57.407	55
	Média	30,4		Média	45,5
	Des. Pad.	9		Des. Pad.	9

Fonte: Elaboração própria, (2020).

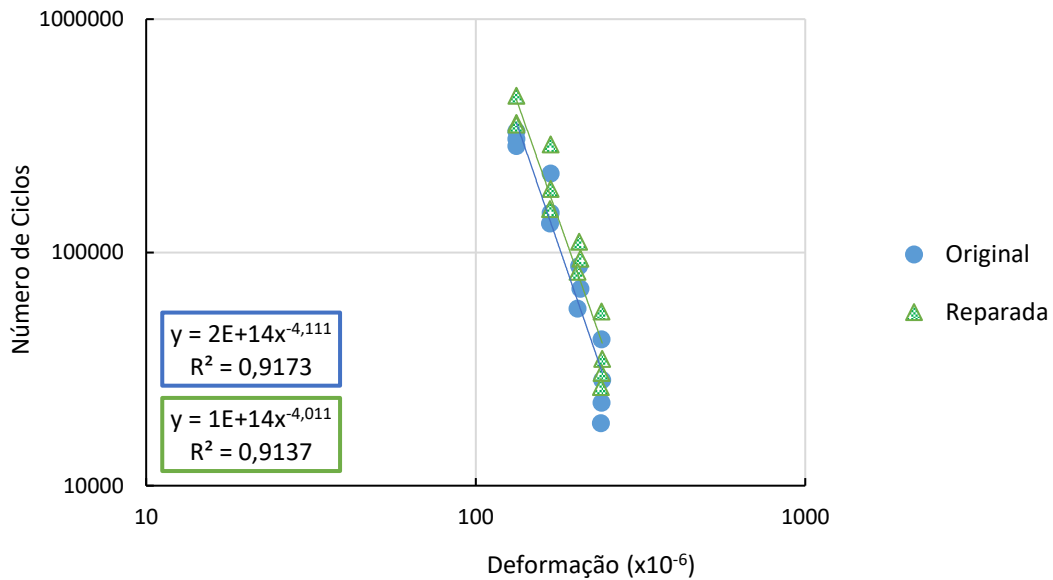
Conforme a Tabela 34, a mistura de referência atingiu um incremento médio no número de ciclos após a aplicação do protocolo de reparação de 30,4% e desvio padrão de 9% (recuperação mínima de 15% e recuperação máxima de 44%). Todavia, para a mistura asfáltica modificada, a porcentagem média de reparação atingiu 45,5% com desvio padrão de 9% (recuperação mínima de 36% e máxima de 65%), valor aproximadamente 33% maior que para a mistura de referência.

Dentre os fatores que influenciaram este acréscimo, tem-se: a maior taxa de aquecimento da mistura modificada, que promoveu uma “cicatrização” das microfissuras de maneira mais eficiente e o efeito de ancoragem das fibras metálicas, que ocasionou uma maior dissipação das tensões de carregamento nas amostras (fazendo com que estas suportassem uma quantidade superior de ciclos de carregamento em comparação à mistura sem incorporação).

Neste contexto, as Figuras 76 e 77 exprimem os resultados de reparação alcançados para as curvas de fadiga de ambas as misturas. O distanciamento entre curvas reflete o aumento no número de ciclos obtido após a reparação da mistura asfáltica (sendo que a curva reparada corresponde ao somatório do número de ciclos no ensaio de fadiga e o número de ciclos alcançado após a reparação). Este

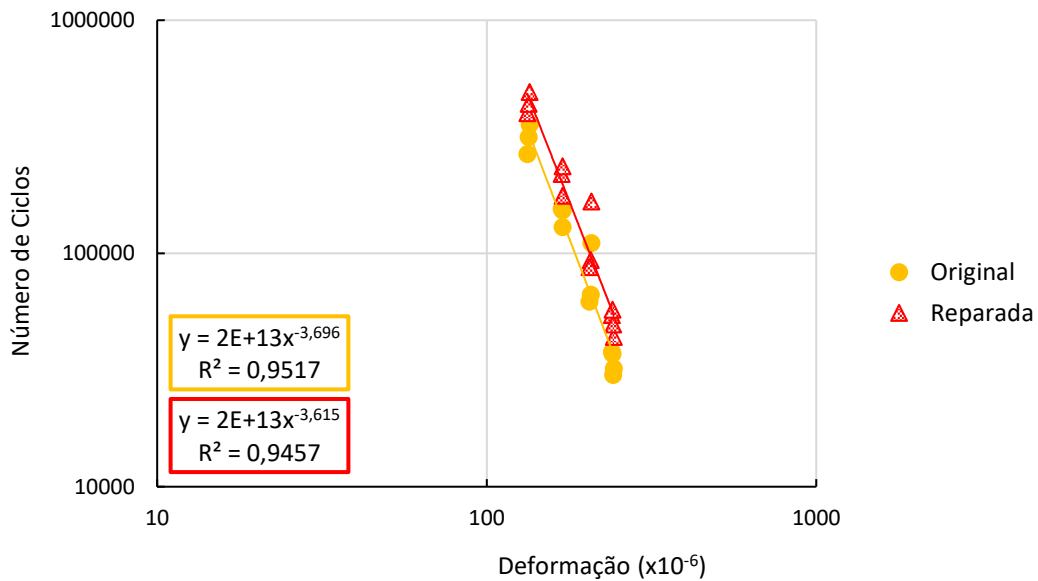
distanciamento pode ser expresso através de um fator de translação, uma vez que a curva original versus reparada apresentam inclinações praticamente iguais, correspondendo a 1,30 para a mistura de referência e 1,46 para a mistura modificada.

Figura 76 - Comparativo entre as curvas de fadiga da mistura de referência, prévia e posteriormente o procedimento de reparação.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Figura 77 - Comparativo entre as curvas de fadiga da mistura modificada, prévia e posteriormente o procedimento de reparação.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Ao confrontar as inclinações obtidas entre as curvas originais e reparadas, verifica-se que para a mistura de referência (Figura 76), obteve-se uma inclinação da curva de fadiga original de 4,11, enquanto a curva de fadiga reparada alcançou uma inclinação de 4,01. É possível inferir que o processo de reparação ocorreu uniformemente na mistura e de maneira efetiva, visto que a curva reparada apresenta uma inclinação muito próxima à curva original da mistura.

Quando analisada a mistura modificada (Figura 77), observa-se uma inclinação de 3,696 para a mistura modificada “original” (ou seja, sem reparação), já quando analisada a curva da mistura modificada reparada, a inclinação atinge um valor de 3,615, corroborando com a efetividade no processo de regeneração obtido para a mistura de referência.

A menor inclinação observada para as curvas de fadiga da mistura modificada está associada às incorporações presentes nesta mistura. Conforme discutido anteriormente, devido à presença da lã de aço e do NTC, durante o carregamento no ensaio de fadiga, parte das tensões são absorvidas pelas fibras metálicas e – devido à maior rigidez do material metálico – estas tensões são mais facilmente dissipadas. Assim, a sensibilidade da mistura modificada aos níveis de deformação é reduzida em comparação à mistura sem fibras metálicas.

Por fim, retomando a abordagem apresentada no início desta seção, a reparação das misturas estudadas considerou duas perspectivas: recuperação do módulo dinâmico e aumento na vida de fadiga. Relacionando estas informações foi possível estabelecer qual foi a degradação sofrida pelo módulo dinâmico recuperado a cada intervalo de 100 ciclos de carregamento na sobrevida. A Tabela 35 sintetiza esse comportamento.

Tabela 35 – Degradação do módulo dinâmico recuperado a cada 100 ciclos de carregamento, considerando a mistura de referência e modificada, respectivamente.

Mistura de Referência				Mistura Modificada			
ε ($\mu\text{m}/\text{m}$)	$ E^* _{\text{Rec.}^1}$ (MPa)	Nº ciclos [sobrevida]	Degradação do módulo recuperado a cada 100 ciclos na sobrevida	ε ($\mu\text{m}/\text{m}$)	$ E^* _{\text{Rec.}^1}$ (MPa)	Nº ciclos [sobrevida]	Degradação do módulo recuperado a cada 100 ciclos na sobrevida
133	2180	73361	2,97	133	2729	132860	2,05
133	2207	138678	1,59	134	3078	122878	2,50
133	1849	47218	3,92	135	1782	134915	1,32
169	2473	72518	3,41	169	2687	64244	4,18
168	2567	20489	12,53	170	2035	47207	4,31
169	2218	39332	5,64	170	2095	83678	2,50
206	2664	23656	11,26	207	1764	27083	6,51
208	2467	24058	10,25	205	1943	25231	7,70
204	1912	25071	7,63	208	2543	56420	4,51
242	2780	6575	42,28	243	2809	11839	23,73
241	1696	7792	21,77	240	2311	16591	13,93
240	1678	7968	21,06	242	2622	19499	13,45
241	2462	13438	18,32	241	2484	20324	12,22
Média			12,51	Média			7,61
Desv. Pad.			11,27	Desv. Pad.			6,53

¹ $|E^*|_{\text{Rec.}}$ = Módulo dinâmico recuperado (MPa)

Fonte: Elaboração própria, (2020).

Uma vez que o módulo dinâmico apresenta mesmo nível de recuperação para as duas misturas, quando se distribui este resultado a cada 100 ciclos de sobrevivida, percebe-se uma diferença de desempenho entre misturas: a mistura modificada apresenta índice médio de perda do módulo dinâmico a cada 100 ciclos de 7,61 (desvio padrão de 6,53), enquanto a mistura de referência apresenta perda de 12,51 (desvio padrão de 11,27), valor aproximadamente 64% maior.

Este aspecto corrobora com os demais resultados discutidos acerca da vida de fadiga das misturas estudadas, nos quais foi verificado que a mistura modificada demanda um número de ciclos de carregamento superior ao da mistura de referência para que o módulo dinâmico recuperado seja degradado. É importante frisar a influência das fibras metálicas e do NTC no aquecimento da mistura asfáltica modificada e sua contribuição na reparação.

Uma vez que a mistura modificada atinge temperaturas mais elevadas em um mesmo período de aquecimento que a mistura de referência, a capacidade do ligante asfáltico fluir por entre as fissuras (selando-as) é maior, o que produz uma “cicatrização” mais eficiente da mistura.

Estes aspectos justificam a diferença de 33% obtida na avaliação da sobrevida das misturas asfálticas e de 64% na degradação do módulo dinâmico a cada 100 ciclos de carregamento. Desta forma, foi possível inferir que a qualidade do efeito reparador da mistura modificada foi superior à da mistura de referência.

Por fim, a partir da porcentagem média de reparação obtida na vida de fadiga para a mistura modificada (45,5%), foi possível calcular a reparação normalizada ($1/(J/m^3)$), definida pela razão entre a % de reparação atingida e a densidade de energia (J/m^3) utilizada no procedimento de aquecimento. A reparação normalizada mede, de certa forma, a eficiência da técnica/protocolo de aquecimento utilizado em conjunto com o potencial de reparação do material. A mistura de referência e a modificada apresentam um valor de $48,3 \times 10^{-8}$ e $72,2 \times 10^{-8}$ ($1/(J/m^3)$), respectivamente.

A Tabela 36 apresenta a reparação normalizada obtida por diversos estudos, que avaliaram a reparação em misturas asfálticas. Os estudos se diferem pela natureza e teor do ligante asfáltico utilizado, origem mineralógica do agregado, granulometria, geometria do corpo de prova, agente condutivo utilizado, método de aquecimento, análise da reparação sobre diferentes abordagens de ruptura do material, entre outros fatores. Contudo, apesar das diferenças entre os estudos, é possível fazer um comparativo global entre o resultado obtido neste estudo com os demais em termos de reparação normalizada.

Tabela 36 - Comparativo, em termos de reparação normalizada ($1/(J/m^3)$), entre estudos acerca de mecanismos de potencialização da propriedade reparadora de misturas asfálticas.

Autor	Incorporação	Método de aquecimento	Geometria do corpo de prova	% de reparação atingida	Reparação normalizada ($1/(J/m^3)$)
Liu <i>et al.</i> (2017)	Lã de aço	Bobina de indução	Semi circular	45	$7,2 \times 10^{-8}$
Karimi <i>et al.</i> (2019)	Lã de aço	Micro-ondas	Semi circular	68	25×10^{-8}
Norambuena-Contreras e Garcia (2016)	Lã de aço	Bobina de indução	Semi circular	70	$49,3 \times 10^{-8}$
Karimi <i>et al.</i> (2019)	Lã de aço	Micro-ondas	Cilíndrico (Marshall)	76	$31,8 \times 10^{-8}$
Li <i>et al.</i> (2020)	Lã de aço	Bobina de indução	Semi circular	73	$3,8 \times 10^{-8}$
Dai <i>et al.</i> (2013)	Lã de aço	Bobina de indução	Viga	91	100×10^{-8}
Karimi <i>et al.</i> (2018)	Carvão ativado	Micro-ondas	Semi circular	70	$34,3 \times 10^{-8}$
Gómez-Meijide <i>et al.</i> (2018)	Granalha de aço	Bobina de indução	Viga	66	$6,9 \times 10^{-8}$
Norambuena-Contreras <i>et al.</i> (2018)	Cavacos metálicos de usinagem	Micro-ondas	Semi circular	62	$87,3 \times 10^{-8}$
González <i>et al.</i> (2018)	Cavacos metálicos de usinagem	Bobina de indução	Semi circular	65	$0,3 \times 10^{-8}$
Wang <i>et al.</i> (2017)	Pó de grafite	Infravermelho	Viga	94	$68,6 \times 10^{-8}$
Wang <i>et al.</i> (2018)	Pó de grafite	Micro-ondas	Disco compacto (DCT)	82	82×10^{-8}

Fonte: Elaboração própria, (2020).

É possível observar, através da Tabela 36, que – quando analisada pela perspectiva da reparação normalizada – a capacidade regenerativa do material asfáltico pode ser tratada de maneira mais abrangente (englobando a influência das particularidades de cada mistura/protocolo de reparação). Por exemplo: ao avaliar os resultados de Norambuena-Contreras e Garcia, (2016) (lã de aço + bobina de indução) e Karimi *et al.* (2017) (carvão ativado + micro-ondas), ambos atingem porcentagem de reparação de 70%. Todavia, na reparação normalizada, verifica-se que a mistura contendo lã de aço e aquecida por micro-ondas apresenta uma eficácia no processo regenerativo cerca de 30% maior ($49,3 \times 10^{-8}$ ($1/(J/m^3)$) versus $34,3 \times 10^{-8}$ ($1/(J/m^3)$)).

Desta forma, ao confrontar os valores obtidos no presente estudo aos demais valores apresentados na Tabela 36, pode-se inferir que o protocolo de reparação proposto e os agentes condutivos utilizados alcançaram valores elevados de reparação normalizada. Ao avaliar a mistura de referência, constata-se que esta apresenta reparação normalizada ($48,3 \times 10^{-8}$ ($1/(J/m^3)$)) superior, inclusive, às misturas contendo agentes condutivos, mesmo que sua porcentagem de reparação atingida (30,4%) tenha sido inferior às obtidas nos estudos elencados na Tabela 36. Este aspecto indica a eficácia do protocolo de reparação utilizado (tempo de aquecimento e tempo de repouso).

Além disto, quando avaliada a mistura modificada (contendo 16% de fibra de lã de aço e 1% de NTC), observa-se que a reparação normalizada da mesma $72,2 \times 10^{-8}$ ($1/(J/m^3)$) atinge o terceiro maior valor para processos de reparação utilizando micro-ondas, e o segundo maior valor para misturas contendo fibras de lã de aço. Em um comparativo geral, levando em consideração todos os estudos elencados na Tabela 36, a mistura modificada do presente estudo atinge o quarto maior valor de reparação normalizada. Estes aspectos evidenciam a eficiência do protocolo de reparação utilizado (tempo e temperatura de aquecimento + tempo de repouso) e, sobretudo, o benefício ocasionado pela incorporação da fibra de lã de aço e do NTC.

Cabe ressaltar, também, o resultado do efeito ponte promovido pela associação do NTC às fibras de lã de aço. Comparando a mistura modificada deste estudo com as misturas contendo lã de aço elencadas na Tabela 36, percebe-se que o NTC potencializa a eficácia do processo regenerativo (sendo o comparativo da mistura (16% lã de aço e 1% NTC) inferior apenas ao estudo de Dai *et al.* (2013), cuja reparação normalizada atinge 100×10^{-8} ($1/(J/m^3)$)).

4.6 ETAPA 6 - APLICAÇÃO EM ESTRUTURAS DE PAVIMENTO HIPOTÉTICAS

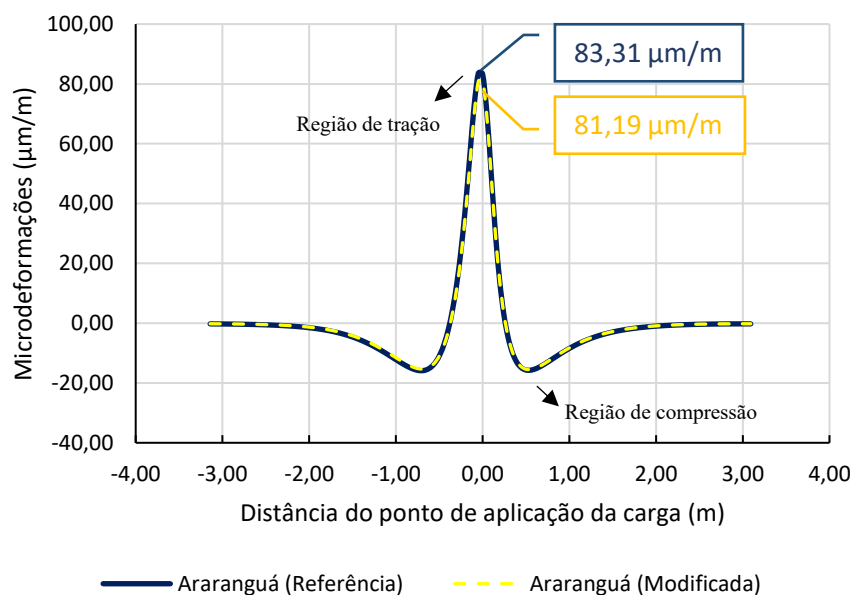
Conforme proposto no plano experimental, a sexta etapa do método compreendeu a simulação numérica de duas estruturas de pavimento hipotéticas no *software* Viscoroute, a fim de estimar o número de solicitações do eixo padrão rodoviário que resultaria na ruptura do revestimento asfáltico por fadiga. As estruturas de pavimento estudadas distinguiram-se, sobretudo, quanto à espessura da camada

de rolamento: 15 cm (BR 101 – Araranguá/SC; $N_{USACE} = 1,64 \times 10^8$) e 6 cm (SC 360 – Urubici/SC; $N_{USACE} = 2,42 \times 10^6$).

Desta forma, foram estabelecidos quatro cenários, cujo comportamento foi avaliado nas duas estruturas de pavimento hipotéticas estudadas. O cenário 1 (C_{en1}) correspondeu à estimativa da vida útil da mistura asfáltica de referência, sem que fossem realizadas intervenções de reparação. O cenário 2 (C_{en2}) considerou a mesma mistura, porém, recorrendo a um processo de reparação. O terceiro cenário (C_{en3}) tratou da mistura modificada, sem repará-la. E, por fim, no cenário 4 (C_{en4}) foi avaliada a mistura modificada com uma intervenção de reparação.

Após a inserção dos parâmetros dos materiais e do carregamento no software Viscoroute, foram calculadas as deformações específicas na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico (considerando as duas misturas asfálticas propostas). Estas deformações foram calculadas para as estruturas de pavimento localizadas nos trechos de Araranguá/SC (BR 101 - 15 cm) e Urubici/SC (SC 360 - 6 cm). Os dados retornados pelo *software* foram obtidos numérica e graficamente. A Figura 78 apresenta a deformação de tração específica para a mistura de referência e modificada, ambas para o trecho de Araranguá.

Figura 78 - Deformação específica obtida na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico (15 cm) para Araranguá/SC, considerando as misturas de referência e modificada.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

A Figura 78 demonstra que, com a aproximação do carregamento (eixo padrão) ao ponto em análise (0,0) (entre rodas), verificam-se tensões de compressão atuando no ponto (0,0). Com o carregamento acerca de 0,6 m de distância do ponto (0,0), são observadas as tensões de compressão máximas. No instante em que o carregamento chega ao ponto (0,0) tem-se a máxima deformação específica de tração, para a qual a mistura de referência apresenta valor aproximadamente 3% superior à mistura modificada (83,31 $\mu\text{m/m}$ e 81,19 $\mu\text{m/m}$, respectivamente).

Conforme discutido nas etapas anteriores, a incorporação da fibra de lã de aço e do NTC contribuiu no aumento da rigidez da mistura modificada frente a mistura de referência na temperatura de 20 °C, tornando-a menos suscetível à deformação produzida pelo carregamento.

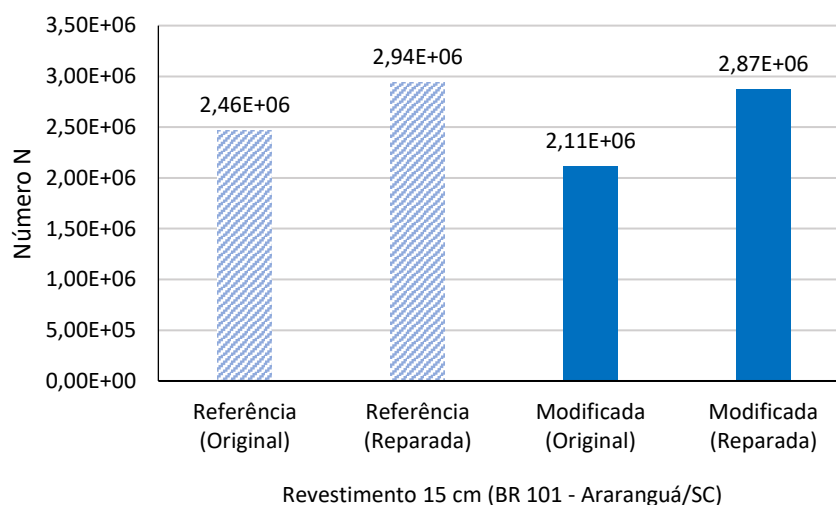
Aplicando estas informações nas equações de fadiga obtidas para a mistura de referência (original e reparada) e para a mistura modificada (original e reparada) e utilizando o fator campo-laboratório correspondente a 1, pôde-se estimar o número N equivalente a cada um dos cenários propostos. Os resultados são apresentados na Tabela 37 e ilustrados graficamente na Figura 79, a seguir.

Tabela 37 - Número máximo de passadas do eixo rodoviário padrão para ambas as misturas (originais e reparadas), considerando suas respectivas equações de fadiga e níveis de deformação específica obtidos (espessura do revestimento de 15 cm, Araranguá/SC).

Tipo de mistura	Cenário	Equação de fadiga	ϵ_t ($\mu\text{m/m}$)	$N_{8,2t}$
Referência (Original)	C _{en1}	$1,93 \times 10^{14} (\epsilon t)^{-4,111}$	83,31	2,46E+06
Referência (Reparada)	C _{en2}	$1,49 \times 10^{14} (\epsilon t)^{-4,011}$	83,31	2,94E+06
Modificada (Original)	C _{en3}	$2,41 \times 10^{13} (\epsilon t)^{-3,696}$	81,19	2,11E+06
Modificada (Reparada)	C _{en4}	$2,30 \times 10^{13} (\epsilon t)^{-3,615}$	81,19	2,87E+06

Fonte: Elaboração própria, (2020).

Figura 79 - Comparativo entre o desempenho da mistura de referência e da mistura modificada, com e sem reparação, para 15 cm de espessura de revestimento (Araranguá/SC).



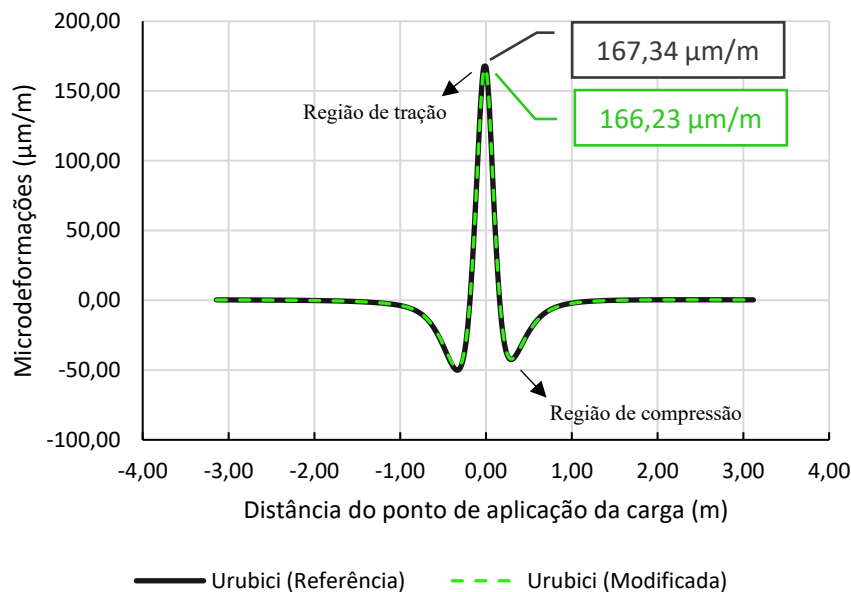
Fonte: Elaboração própria, (2020).

Quando comparadas a mistura de referência e modificada nas suas respectivas equações de fadiga, desconsiderando a reparação de ambas (C_{en1} e C_{en3}), constata-se que a mistura de referência suporta um número maior de passadas do eixo padrão (cerca de 15%) até que ocorra a ruptura da camada de revestimento pelo fenômeno da fadiga, mesmo apresentando deformação específica superior à modificada. Este aspecto está associado ao melhor desempenho da mistura de referência em níveis de deformação menores que $160 \mu\text{m/m}$, uma vez que – conforme abordado na etapa anterior – sua curva de fadiga apresenta inclinação mais acentuada em comparação à mistura modificada.

Quando considerado o efeito da reparação das misturas, foi possível observar que ambas as misturas reparadas apresentam melhor desempenho em comparação às misturas originais (C_{en2} e C_{en4}). O comparativo entre a mistura de referência (C_{en1} e C_{en2}) aponta um número de passadas do eixo padrão cerca de 16% maior quando considerada sua reparação. Para a mistura modificada (C_{en3} e C_{en4}), o processo de reparação promoveu um acréscimo de 27% no número de passadas do eixo padrão que culminariam na ruptura do revestimento asfáltico por fadiga, frente a mistura modificada não reparada; aspecto que comprova o benefício da incorporação de lã de aço e NTC visando ampliar a vida útil do revestimento asfáltico.

Em uma segunda análise, os quatro cenários propostos foram aplicados para o trecho da SC 360 localizado em Urubici/SC. Esta análise teve como objetivo comparar o desempenho de ambas as misturas, quando aplicadas em uma rodovia de menor volume de tráfego e, conseqüentemente, com uma estrutura de pavimento com camada de revestimento mais esbelta (6 cm). A Figura 80 ilustra a deformação de tração máxima obtida para a fibra inferior do revestimento asfáltico (considerando a mistura de referência e a mistura modificada).

Figura 80 - Deformação específica obtida na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico (6 cm) para Urubici/SC, considerando as misturas de referência e modificada.



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Com base nas deformações específicas máximas de tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico obtidas na Figura 80, 167,34 $\mu\text{m/m}$ para a mistura de referência e 166,23 $\mu\text{m/m}$ para a mistura modificada, calculou-se o número de passadas do eixo rodoviário padrão que ocasionaria a ruptura do revestimento por fadiga. Novamente, reforça-se o fato de a mistura modificada apresentar menor deformação específica de tração na fibra inferior da camada de revestimento (cerca de 0,7%). Este aspecto está associado à contribuição da fibra metálica e do NTC incorporados à mistura modificada.

Todavia, a diferença obtida entre as deformações de tração para a camada de rolamento do trecho de Urubici/SC foi menos expressiva, dada a maior esbelteza da camada de revestimento em comparação à análise anterior. A Tabela 38 sintetiza os

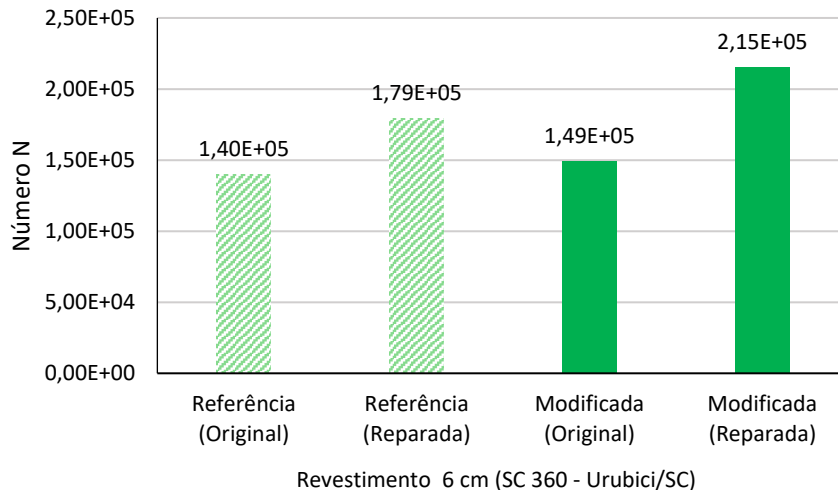
resultados obtidos, considerando as intervenções propostas nos quatro cenários estudados e fator campo-laboratório igual a 1. Estes resultados são graficamente ilustrados na Figura 81.

Tabela 38 - Número máximo de passadas do eixo rodoviário padrão para ambas as misturas (originais e reparadas), considerando suas respectivas equações de fadiga e níveis de deformação específica obtidos (espessura do revestimento de 6 cm, Urubici/SC).

Tipo de mistura	Cenário	Equação de fadiga	ϵ_t ($\mu\text{m}/\text{m}$)	$N_{8,2t}$
Referência (Original)	C_{en1}	$1,93 \times 10^{14} (\epsilon_t)^{-4,111}$	167,34	1,40E+05
Referência (Reparada)	C_{en2}	$1,49 \times 10^{14} (\epsilon_t)^{-4,011}$	167,34	1,79E+05
Modificada (Original)	C_{en3}	$2,41 \times 10^{13} (\epsilon_t)^{-3,696}$	166,23	1,49E+05
Modificada (Reparada)	C_{en4}	$2,30 \times 10^{13} (\epsilon_t)^{-3,615}$	166,23	2,15E+05

Fonte: Elaboração própria, (2020).

Figura 81 - Comparativo entre o desempenho da mistura de referência e da mistura modificada, com e sem reparação, para 6 cm de espessura de revestimento (Urubici/SC).



Fonte: Elaboração própria, (2020).

Quando confrontado o C_{en1} e o C_{en3} , através dos resultados da Tabela 38, foi possível constatar que a mistura modificada (original) suporta um número de passadas do eixo padrão rodoviário 6% maior que a mistura de referência (original). O mesmo comparativo para o C_{en2} e C_{en4} aponta um número N aproximadamente 17% maior para a mistura modificada reparada, em comparação à mistura de referência (também reparada). Este comparativo sugere um comportamento oposto ao obtido para Araranguá/SC.

Esse aspecto está associado à inclinação das curvas de fadiga originais e reparadas (discutidas anteriormente) para ambas as misturas. Conforme visto, a mistura modificada apresentou inclinação menor (original: 3,69 e reparada: 3,61) em comparação à mistura de referência (original: 4,11 e reparada: 4,01). Desta forma, por apresentar inclinação mais acentuada nas curvas de fadiga, a mistura de referência apresenta melhor desempenho para microdeformações menores que 160 $\mu\text{m}/\text{m}$. Enquanto a mistura modificada, devido à menor inclinação observada nas curvas de fadiga, apresenta melhor desempenho em microdeformações superiores a 160 $\mu\text{m}/\text{m}$, valor que abrange as microdeformações obtidas para Urubici/SC.

Comparando os C_{en3} e C_{en4} , tem-se que a mistura modificada reparada suporta um número de passadas do eixo rodoviário padrão 30% maior que a mistura modificada original. Corroborando com os resultados de ampliação da vida de fadiga das misturas asfálticas através do processo de reparação. Para a mistura de referência, C_{en1} e C_{en2} , tem-se um ganho de aproximadamente 22% no número N quando considerada uma intervenção de reparação aplicada.

Desta forma, comparando os quatro cenários propostos e as estruturas de pavimento para os dois trechos analisados (BR 101 – Araranguá/SC e SC 360 – Urubici/SC) conclui-se que a aplicação da técnica de reparação foi benéfica para ambas as misturas (referência e modificada), nos dois trechos de rodovia. Porém, quando confrontados os desempenhos da mistura modificada (para Araranguá/SC e para Urubici/SC) pode-se concluir que: a incorporação de fibras metálicas e NTC na mistura asfáltica com a finalidade de reparação se sobressai para revestimentos mais esbeltos e submetidos a um menor volume de tráfego.

A menor sensibilidade da mistura modificada aos níveis de deformações torna-a superior à mistura de referência para níveis mais elevados de deformação, indicando a aplicação da técnica de reparação em pavimentos de rodovias de menor volume de tráfego (que, de acordo com a Confederação Nacional de Transporte (2019), refletem uma parcela significativa das rodovias no Brasil). Ademais, o desvio do tráfego nestas rodovias, em possíveis intervenções de manutenção para aplicação da técnica de reparação, ocorrerá de forma mais fácil que para rodovias de alto volume de tráfego. Assim como, em revestimentos mais esbeltos acredita-se que as técnicas de indução de calor em campo sejam mais exequíveis.

Cabe ressaltar que, além da avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas com potencial de reparação ao dano, é importante analisar a viabilidade econômica deste sistema (desde a sua concepção, na formulação da mistura asfáltica, no tipo e características da fonte externa de aquecimento utilizada, bem como no seu processo executivo). Desta forma, a avaliação mecânica e de desempenho da mistura deve ser somada à avaliação do ciclo de vida deste tipo de técnica, possibilitando um maior entendimento do custo-benefício da aplicação de misturas asfálticas com incorporações de fibras de lã de aço e nanotubos de carbono para fins de regeneração ao dano.

Estes fatores também são abordados por Tabakovic e Schlangen (2015), que apontam que, para uma avaliação econômica precisa da variação de custos que misturas asfálticas reparadoras podem gerar, deve-se comparar as alterações (aumento) nos custos de aquisição de material para confecção da mistura com as alterações (redução) nos custos de manutenção.

A título de exemplo, de acordo com os autores supracitados, a Holanda apresenta custos anuais relacionados à grandes reparos e ao congestionamento de tráfego gerado por estes de cerca de 65 milhões de euros (para uma extensão da vida útil do asfalto de 25%) e mais de 100 milhões de euros (para uma extensão da vida útil do pavimento de 50%). Mesmo que o preço da mistura asfáltica reparadora fosse o dobro da mistura padrão, a Holanda economizaria cerca de 90 milhões de euros por ano investindo em uma mistura reparadora com vida útil prolongada de 50%, em comparação ao asfalto poroso tradicional (TABAKOVIC e SCHLANGEN, 2015).

Convém ressaltar que esta é uma análise exemplificativa, com o intuito de suscitar outros aspectos acerca da aplicação de misturas asfálticas com materiais térmica e eletricamente condutivos, auxiliando no entendimento do custo-benefício atrelado à mistura asfáltica estudada (considerando a incorporação de fibras de lã de aço e NTC) e as demais possibilidades de potencialização da capacidade de recuperação ao dano de misturas asfálticas. Ressalva-se, então, que a avaliação econômica deste tipo de técnica deve considerar não apenas o custo de aquisição dos materiais e confecção da mistura, mas sim aspectos mais abrangentes acerca do

ciclo de vida do pavimento, bem como a redução na periodicidade dos serviços de manutenção do mesmo (e seu consequente impacto econômico).

5 CONCLUSÕES

O presente estudo buscou avaliar o incremento no potencial de reparação de uma mistura asfáltica através da incorporação de materiais térmica e eletricamente condutivos, associados em diferentes escalas (nano e microescala). Neste sentido, o plano experimental realizado conduziu à concretização dos objetivos gerais e específicos propostos, nos quais observou-se que as fibras de lã de aço associadas ao nanotubo de carbono são responsáveis por incrementos no desempenho das misturas asfálticas, sob diversas perspectivas, sendo os principais pontos listados abaixo:

- a) A incorporação, sob peso de ligante asfáltico, de 16% de fibra de lã de aço e 1% de NTC reduziu a resistência elétrica e incrementou a capacidade de condução térmica da mistura asfáltica. Os nanotubos de carbono incrementaram o “efeito ponte” entre as fibras metálicas, que em conjunto aumentaram a taxa de aquecimento da mistura asfáltica.
- b) O procedimento de dosagem ideal para misturas contendo fibras de lã de aço deve considerá-las como um aditivo final à mistura (sem alterações no procedimento de dosagem). Quando considerada como parte do processo de dosagem, a lã de aço acarreta em maior consumo de ligante asfáltico, comprometendo o desempenho à deformação permanente.
- c) O teor de 16% de fibra de lã de aço (utilizado como aditivo final à mistura) e 1% de NTC melhorou o desempenho à deformação permanente da mistura asfáltica. Estes teores também foram benéficos ao comportamento reológico da mistura asfáltica, aumentando o módulo dinâmico e reduzindo o ângulo de fase para temperaturas maiores que 10 °C e frequências de carregamento inferiores a 100 Hz.
- d) A incorporação de 16% de fibra de lã de aço e 1% de NTC não ocasionou decréscimo no desempenho à fadiga da mistura asfáltica, mantendo-se equivalente ao desempenho da mistura de referência.
- e) A mistura modificada apresentou maior sobrevida e menor degradação do módulo dinâmico recuperado em comparação à mistura de referência. Pode-se

concluir que a reparação é potencializada na mistura contendo 16% de fibra de lã de aço e 1% de NTC.

- f) A mistura modificada apresenta reparação normalizada superior à mistura modificada, justificando o benefício da incorporação de fibra de lã de aço e NTC na reparação.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma vez constatada a eficácia do efeito regenerador promovido nas misturas asfálticas pela incorporação de fibras de lã de aço e nanotubos de carbono, sugere-se como pesquisas futuras visando a ampliação do conhecimento construído, os seguintes tópicos:

- a) Avaliar o desempenho, em termos de capacidade de recuperação ao dano das misturas asfálticas, sob a perspectiva de outras abordagens de resistência à fadiga, diferentes da fenomenológica, e sob diferentes protocolos de reparação e aditivos condutores;
- b) Verificar o desempenho em termos de reparação de misturas asfálticas submetidas a diferentes técnicas de aquecimento externas, com o intuito de potencializar a propriedade reparadora;
- c) Aprofundar a avaliação do efeito da incorporação de 16% lã de aço e 1% de NTC no comportamento da mistura asfáltica, com intuito de verificar a resistência à desagregação e ao dano por umidade induzida;
- d) Estudar a influência de misturas asfálticas com diferentes graduações (densa, aberta e descontínua) e diferentes naturezas de ligantes asfálticos no potencial de reparação de uma mistura asfáltica com fibras de lã de aço e NTC;
- e) Avaliar o desempenho em campo de misturas asfálticas contendo fibras de lã de aço e NTC, em termos de potencial de reparação, através da execução de trechos experimentais e aplicação de técnicas de aquecimento.
- f) Avaliar a técnica de reparação de misturas asfálticas sob uma perspectiva econômica, englobando os custos envolvidos na aquisição das incorporações, no tipo de fonte externa de aquecimento utilizada e no processo executivo.

REFERÊNCIAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. **AASHTO M 320: Standard specification for performance-graded asphalt binder.** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2010.

_____. **AASHTO M 323: Standard specification for superpave volumetric mix design.** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2013.

_____. **AASHTO R 30: Standard practice for mixture conditioning of hot mix asphalt (HMA).** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2002.

_____. **AASHTO R 35: Standard practice for Superpave volumetric design for hot-mix asphalt (HMA).** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2012.

_____. **AASHTO T 112: Standard method of test for clay lumps and friable particles in aggregate.** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2012.

_____. **AASHTO T 176: Standard method of test for plastic fines in graded aggregates and soils by use of the sand equivalent test.** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2008.

_____. **AASHTO T 209: Standard method of test for theoretical maximum specific gravity (G_{mm}) and density of hot-mix asphalt (HMA).** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2012.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 5564: Lastro ferroviário – Requisitos e métodos de ensaio.** 2014.

_____. **ABNT NBR 16505: Misturas asfálticas – Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida.** 2016.

ABDO, Ahmad M. Abu; JUNG, S. J. **Effects of Asphalt Mix Design Properties on Pavement Performance: A Mechanistic Approach.** Advances in Civil Engineering. 2016.

AGZENAI, Y; POZUELO, J; PÉREZ, I; BASELGA, J. **Advanced Self-Healing Asphalt Composites in the Pavement Performance Field: Mechanisms at the**

Nano Level and New Repairing Methodologies. Recent Patents on Nanotechnology. P. 43-50. Madrid, Spain. 2015.

AFNOR – Association Française de Normalisation. **AFNOR NF P 98 – 250 – 2: Essais relatifs aux chaussées – préparation des mélanges hydrocarbonés, partie 2: compactage des plaques.** Association Française de Normalisation, AFNOR. 1991.

_____. Association Française de Normalisation. **AFNOR NF P 98 – 253 – 1: Essais relatifs aux chaussées – préparation des mélanges hydrocarbonés, partie 1: essai d’Orniérage.** Association Française de Normalisation, AFNOR. 1993.

AJAM, Harith; LASTRA-GONZÁLES, Pedro; MEIJIDE-GOMÉZ, Breixo; GARCÍA, Álvaro. **Self-Healing of Dense Asphalt Concrete by Two Different Approaches: Electromagnetic Induction and Infrared Radiation.** 8th Rilem International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements. Nantes, France. 2016.

AMERI, Mahmoud; MOHAMMADI, Reza; VAMEGH, Mostafa; MOLAYEM, Mohammad. **Evaluation the effects of nanoclay on permanente deformation behavior of stone mastic asphalt mixtures.** Construction and Building Materials. V. 156. P. 107-113. 2017.

AMIN, Ibrahim; EL-BADAWY, Sherif; BREAKAH, Tamer; IBRAHIM, Mourad H. Z. **Laboratory evaluation of asphalt binder modified with carbon nanotube for Egyptian climate.** Construction and Building Materials. V. 121. P. 361-372. 2016.

ANDRADE, Viviane Dias. **Influência da Formulação de Esqueletos Mineraiis na Deformação Permanente de Misturas de Concreto Asfáltico Densas.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Ciências Mecânicas. Joinville, 2018.

ANITELLI, André. **Estudo do dano por umidade de misturas densas com ligantes asfálticos convencional e modificado com polímero SBS.** Dissertação de Mestrado. 107 p. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2013.

AQEL, Ahmad; EL-NOUR, Kholoud M.M.A.; AMMAR, Reda A.A.; AL-WARTHAN, Abdulrahman. **Carbon nanotubes, science and technology part (I) structure, synthesis and characterisation.** Arabian Journal of Chemistery. V.5. P. 1-23. 2012.

ASHISH, Prabin K.; SINGH, Dharamveer. **High – and Intermediate – Temperature Performance of Asphalt Binder Containing Carbon Nanotube Using Different Rheological Approaches.** Journal of Materials in Civil Engineering. V. 30. P. 1-14. 2018.

ASPHALT INSTITUTE. **Superpave Mix Design.** Superpave Series nº2 (SP-2). Third Edition. United States, 2001.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM C 88: Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate.** USA. 2013.

_____. **ASTM C 127: Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate.** USA. 2012.

_____. **ASTM C 131: Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine.** USA. 2006.

_____. **ASTM C 1252: Standard test method for uncompacted void content of fine aggregate (as influenced by particle shape, surface texture and grading).** USA. 2006.

_____. **ASTM D 5: Standard test method for penetration of bituminous materials.** USA. 2013.

_____. **ASTM D 36: Standard test method for softening point of bitumen (ring-and-ball apparatus).** USA. 2014.

_____. **ASTM D 2726: Standard test method for bulk specific gravity and density of non-absorptive compacted bituminous mixtures.** USA. 2013.

_____. **ASTM D 2872: Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin-film oven test).** USA. 2012.

_____. **ASTM D 4402: Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer.** USA. 2013.

_____. **ASTM D 5821: Standard test method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate.** USA. 2013.

AYAR, Pooyan; NAVARRO-MORENO, Fernando; GÁMEZ-RUBIO, M. Carmen. **The healing capability of asphalt pavements: a state of the art review.** Journal of Cleaner Production. V. 113; P. 28-40. 2015.

BARRA, B. S.; MOMM, L.; BROSSEAUD, Y.; HORNYCH, P. **Diretrizes para a Formulação e Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas.** Revista Pavimentação. ABPV – Associação Brasileira de Pavimentação. V. 17. P. 38-58, 2010.

BARRASA, Raquel C.; LÓPEZ, Víctor B.; MONTOLIU, Carlos M. P.; IBAÑEZ, Verónica C.; PEDRAJAS, Josefina; SANTARÉN, Julio. **Addressing durability of asphalt concrete by self-healing mechanism.** Procedia – Social and Behavioral Sciences. P.188-197. 2014.

BERNUCCI, Liedi B.; MOTTA, Laura M. G.; CERATTI, Jorge A. P.; SOARES, Jorge B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 504 p. Petrobras: ABEDA. Rio de Janeiro, 2006.

BHASIN, Amit; NARAYAN, Atul; LITTLE, Dallas N. **Laboratory Investigation of a Novel Method to Accelerate Healing in Asphalt Mixtures Using Thermal Treatment**. Texas A&M University. Texas, United States. August, 2009.

BLAIZIK, B.J.; KRAMER, S.L.B.; OLUGEBEFOLA, S.C.; MOORE J.S.; SOTTOS, N.R.; WHITE, S.R. **Self-Healing Polymers and Composites**. Annual Review of Materials Research. California, United States. April. 2010.

BOMMAVARAM, Ramamohan R. **Evaluation of Healing in Asphalt Binders Using Dynamic Shear Rheometer and Molecular Modeling Techiques**. Master of Science Dissertation. Texas A&M University. Texas, United States. August, 2008.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER. Método de Ensaio **DNER-ME 078/94. Agregado graúdo – Adesividade a ligante betuminoso**. Rio de Janeiro, 1994.

_____. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER. Método de Ensaio **DNER-ME DNER 084/95. Agregado miúdo – determinação da densidade real**. Rio de Janeiro, 1995.

_____. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER. Método de Ensaio **DNER-ME DNER 085/95. Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real**. Rio de Janeiro, 1994.

_____. Confederação Nacional de Transportes - CNT. **Transporte Rodoviário: impactos da qualidade do asfalto sobre o transporte rodoviário**. Brasília, 2019.

BROWNRIDGE, Jim. **The Role of an Asphalt Rejuvenator in Pavement Preservation: Use and Need for Asphalt Rejuvenation**. First International Conference on Pavement Preservation. P.351-364. California, United States. 2010.

BUTT, Ali Azhar; BIRGISSON, Björn; KRINGOS, Niki. **Optimizing the Highway Lifetime by Improving the Self Healing Capacity of Asphalt**. Procedia – Social and Behavioral Sciences. P. 2190-2200. Stockholm, Sweden. 2012.

CARPENTER, Samuel; SHEN, Shihui. **Dissipated Energy Approach to Study Hot-Mix Asphalt Healing in Fatigue**. Journal of the Transportation Research Board. P. 178-185. 2006.

CASTRO, Newton de; CARRIS, Larry; RODRIGUES, Bruno. **Custos de transporte e a estrutura espacial do comércio interestadual brasileiro**. Pesquisa e Planejamento Econômico. V. 29. P. 347-400. 1999.

CHABOT, A.; TAMAGNY, P.; POCHÉ, D.; DUHAMEL, D. **Visco-elastic modelling for asphalt pavements – Software ViscoRoute**. 10th International Conference on Asphalt Pavements, ISAP Proceedings. V.2. P. 937-946. Quebec, Canada. 2006.

CHU, Kunmo; KIM, Dongouk; SOHN, Yoonchul; LEE, Sangeui; MOON, Changyoul; PARK, Sunghoon. **Electrical and Thermal Properties of Nanotube Composite for Flexible Electric Heating-Unit Applications**. IEEE Electron Device Letters. V. 34. P. 668-770. 2013.

COMINSKI, Ronald J.; HUBER, Gerald A.; KENNEDY, Thomas W.; ANDERSON, Michael. **The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays**. SHRP-A-407. Strategic Highway Research Program. Washington, DC 1994.

DAI, Qingli; WANG, Zigeng; HASAN, Mohd Rosli M. **Investigation of induction healing effects on electrically conductive asphalt mastic and asphalt concrete beams through fracture-healing tests**. Construction and Building Materials. V. 49. P. 729-737. 2013.

DI BENEDETTO, Hervé; OLARD, François; SAUZÉAT, Cédric; DELAPORTE, Brice. **Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: From binders to mixes**. Road Materials and Pavement Design. P. 163-202. Londres, 2004.

DIAB, Aboelkasim; SINGH, Dharamveer; PAIS, Jorge Carvalho. **Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures: A Literature Review**. 2017.

DINH, Ba Huu; PARK, Dae-Wook; PHAN, Tam Minh. **Healing Performance of Granite and Steel Slag Asphalt Mixtures Modified with Steel Wool Fibers**. KSCCE Journal of Civil Engineering. V.22. P. 2064-2072. 2018.

DINIZ, Clélio Campolina. **Capitalismo, recursos naturais e espaço (Análise do papel dos recursos naturais e dos transportes para a dinâmica geográfica da produção agropecuária e mineral no Brasil e seus efeitos no padrão regional brasileiro)**. Tese de Doutorado. 279 p. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Economia. Campinas, 1987.

EN – European Standard. **EM 12697-24: Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt, part 24: Resistance to fatigue**. CEN, Brussels. 2004.

_____. **EM 12697-26: Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt, part 26: Stiffness**. CEN, Brussels. 2004.

FANG, Changquin; YU, Ruien; LIU, Shaolong; LI, Yan. **Nanomaterials Applied in Asphalt Modification: A Review**. Journal of Materials Science and Technology. V 29. P. 589-594. 2013.

FERREIRA, Lygia Maria Policarpio. **Fabricação e caracterização de compósitos de alumínio reforçado com nanopartículas magnéticas, via metalurgia do pó.** Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas. P. 203. Campinas, 2017.

FIGUEIREDO, Antonio.D. **Concreto reforçado com fibras.** Tese de Doutorado. 248p. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil II. São Paulo, 2011.

FISCHER, Hartmut. **Self-repairing material systems – a dream or a reality?** Journal of Natural Science. P. 873-901. 2010.

FONSECA, Alexandre F. **Mini curso: introdução às propriedades físicas e estruturais do grafeno e dos nanotubos de carbono.** Universidade Federal Fluminense. Instituto de Ciências Exatas. P. 28. 2011.

FRANESQUI, Miguel A.; YEPES, Jorge; GARCÍA-GONZÁLES, Cándida. **Top-down cracking self-healing of asphalt pavements with steel filler from industrial waste applying microwaves.** Construction and Building Materials. V. 149. P. 612-620. 2017.

GALLEGO, Juan; VAL, Miguel A. del; CONTRERAS, Verónica; PÁEZ, Antonio. **Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing.** Construction and Building Materials. V. 42. P. 1-4. 2013.

GAO, Jie; GUO, Haoyan; WANG, Xiaofeng; WANG, Pei; WEI, Yongfeng; WANG, Zhenjun; HUANG, Yue; YANG, Bo. **Microwave deicing for asphalt mixture containing steel wool fibers.** Journal of Cleaner Production. P. 1110-1122. 2018.

GARCEZ, Estela O. **Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impacto.** Dissertação de Mestrado. 141 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2005.

GARCÍA, Álvaro. **Self-healing of open cracks in asphalt mastic.** Fuel: The Science and Technology of Fuel and Energy. September, 2011.

GARCÍA, Alvaro; CONTRERAS, Norambuena J.; PARTL, Manfred N. **Experimental evaluation of dense asphalt concrete properties for induction heating purposes.** Construction and Building Materials. P. 48-54. 2013.

GARCÍA, Alvaro; NORAMBUENA-CONTRERAS, Jose; BUENO, Moises; PARTL, Manfred N. **Single and Multiple healing of porous and dense asphalt concrete.** Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2014b.

GARCÍA, Alvaro; NORAMBUENA-CONTRERAS, José; PARTL, Manfred N.; BUENO, Moises. **Influence of Steel Wool Fibers on the Mechanical, Thermal, and Healing Properties of Dense Asphalt Concrete.** Journal of Testing and Evaluation. P. 1007-1018. Setembro, 2014a.

GARCÍA, Alvaro; NORAMBUENA-CONTRERAS, José; PARTL, Manfred N.; SCHUETZ, Philipp. **Uniformity and mechanical properties of dense asphalt concrete with steel wool fibers.** Construction and Building Materials. P. 107-117. Março, 2013.

GARCÍA, Álvaro; SCHLANGEN, Erik; VEN, Martin van de. **Two Ways of Closing Cracks on Asphalt Concrete Pavements: Microcapsules and Induction Heating.** Key Engineering Materials. V. 417-418. P. 573-576. 2009a.

GARCÍA, Álvaro; SCHLANGEN, Erik; VEN, Martin van de; LIU, Quantao. **Electrical conductivity of asphalt mortar containing conductive fibers and fillers.** Construction and Building Materials. V.23. P. 3175-3181. 2009b.

GOLI, A.; ZIARI, H.; AMINI, A. **Influence of Carbon Nanotubes on Performance Properties and Storage Stability of SBS Modified Asphalt Binders.** Journal of Materials in Civil Engineering. V. 29. 2017.

GOMÉZ-MEIJIDE, Breixo; AJAM, Harith; LASTRA-GONZÁLES, Pedro; GARCIA, Alvaro. **Effect of ageing and RAP content on the induction healing properties of asphalt mixtures.** Construction and Building Materials, 2018.

GONZÁLES, A.; NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; STOREY, L.; SCHLANGEN, E. **Self-healing properties of recycled asphalt mixtures containig metal waste: An approach through microwave radiation heating.** Journal of Environmental Management. V.214. P. 242-251. 2018.

GRADZKA, Emilia; WINKLER, Krzysztof. **Recent Progress on Electrochemical Capacitors Based on Carbon Nanotubes.** Carbon Nanotubes – Recent Progress. P. 147-187. 2018.

GUO, Qinglin; LI, Lili; CHENG, Yongchun; XU, Chun. **Laboratory evaluation on performance of diatomite and glass fiber compound modified asphalt mixture.** Materials and Design. V.66.P.51-59. 2014.

HAN, Zhe; ALVARADO, Juan D. P.; STONE, Cody; ZHANG, Zhanmin. **Incorporating uncertainties into determination of flexible pavement preventive maintenance interval.** Transportmetrica A: Transport Science. P. 1-21. 2018.

HAN, Zhidong; FINA, Alberto. **Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review.** Progress in Polymer Science. P. 914-944. Dezembro, 2011.

HAQ, Muhammad Faizan ul; AHMAD, Naveed; NASIR, Muhammad Ali; HAFEEZ, Jamal Murryam; RAFI, Javaria; ZAIDI, Syed Bilal Ahmed; HAROON, Waqas. **Carbon Nanotubes (CNTs) in Asphalt Binder: Homogeneous Dispersion and Performance Enhancement.** Applied Sciences. V. 8. 2018.

HARVEY, John T.; DEACON, John A.; TSAI, Bor-Wen; MONISMITH, Carl L. **Fatigue Performance of Asphalt Concrete Mixes and It's Relationship to Asphalt Concrete Pavement Performance in California.** Asphalt Research Program. University of California, Barkely. October, 1995.

JAHROMI, Saeed Ghaffarpour; KHODAI, Ali. **Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder.** Construction and Building Materials. V. 23. P. 2894-2904. 2009.

KAHRAMAN, Sair; FENER, Mustafa. **Electrical resistivity measurements to predict abrasion resistance of rock aggregates.** Bulletin of Materials Science. V. 31. P. 179-184. 2007.

KARIMI, Mohammad; DARABI, Masoud; JAHANBAKHSH, Hamid; RUSHING, John. **Effect of steel wool fibers on mechanical and induction heating response of conductive asphalt concrete.** International Journal of Pavement Engineering. 2019.

KARIMI, Mohammad; JAHANBAKHSH, Hamid; BEHNAM, Jáhangiri; NEJAD, Fereidoon. **Induced heating-healing characterization of activated carbon modified asphalt concrete under microwave radiation.** Construction and Building Materials. 2018.

KHALID, H. A. **A comparison between bending and diametral fatigue tests for bituminous materials.** Materials and Structures. V. 33. P. 457-465. 2000.

KIM, Booil; ROQUE, Reynaldo. **Evaluation of Healing Property of Asphalt Mixtures.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. P. 84-91. 2006.

KRINGOS, N.; SCHMETS, A.; SCARPAS, A. **Towards an understanding of the self-healing capacity of asphaltic mixtures.** HERON. P. 45-74. Delft, Netherlands. 2011.

KUMANEK, Bogumita; JANAS, Dawid. **Thermal conductivity of carbono nanotube networks: a review.** Journal of Materials Science. V. 54. P. 7397-7427. 2019.

LATIFI, Hassan; HAYATI, Parham. **Evaluating the effects of the wet and simple processes for including carbono Nanotube modifier in hot mix asphalt.** Construction and Building Materials. V. 164. P. 326-336. 2018.

LCPC, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. **Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés.** Paris, France. Septembre, 2007.

LEEGWATER, G.A.; SCARPAS, A.; ERKENS, S.M.J.G. **Mechanisms in Healing of Bitumen and the Impact of Normal Force.** 8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements. Nantes, France. June, 2017.

LITTLE, Dallas N.; LYTTON, Robert L.; WILLIAMS, Devon; CHEN, C.W. **Microdamage Healing in Asphalt and Asphalt Concrete, Volume I: Microdamage and Microdamage Healing, Project Summary Report.** Research Report 7229. Texas Transportation Institute. Texas, United States. June, 2001.

LITTLE, Dallas N.; LYTTON, Robert L.; WILLIAMS, Devon; KIM, Richard Y. **An Analysis of the Mechanism of Microdamage Healing based on the Application of Micromechanics First Principles of Fracture and Healing.** Association of Asphalt Paving Technologists. P. 1-41. August, 1998.

LIU, Quantao. **Induction Healing of Porous Asphalt.** Doctoral Thesis. Delft University of Technology. Delft, Netherlands. 2012.

LIU, Quantao; LI, Bin; SCHLANGEN, Erik; SUN, Yihan; WU, Shaopeng. **Research on the Mechanical, Thermal, Induction Heating and Healing Properties of Steel Slag/Steel Fibers Composite Asphalt Mixture.** Applied Sciences. V. 7. P.1088. 2017

LIU, Quantao; SCHLANGEN, Erik; GARCÍA, Álvaro; VEN, Martin Van de. **Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete.** Construction and Building Materials. V. 24. P. 1207-1213. 2010.

LIU, Quantao; SCHLANGEN, Erik; VEN, Martin Van de; BOCHOVE, Gerbert Van; MONTFORT, Jo Van. **Evaluation of the induction healing effect of porous asphalt concrete through four point bending fatigue test.** Construction and Building Materials. P. 403-409. November, 2011.

LIU, Quantao; YU, Wan; WU, Shaopeng; SCHLANGEN, Erik; PAN, Pan. **A comparative study of the induction healing behaviors of hot and warm mix asphalt.** Construction and Building Materials. V. 144. P. 663-670. 2017

LU, Xiaohu; SOENEN, Hilde; REDELIUS, Per. **Fatigue and healing characteristics of bitumens studied using dynamic shear rheometer.** 6th RILEM Symposium PTEBM'03. Zurich, Switzerland. 2003.

LU, Xin. **Investigation of the Fracture Healing and Mechanism of Asphalt Binders.** Doctoral Thesis. Washington State University. Washington D.C., United States. July, 2013.

LYTTON, Robert L. **Characterizing Asphalt Pavements for Performance.** Transportation Research Record - 1723. P. 5-16. 2000.

MA, Tao; ZHANG, Yao; YAN, Jinhai; YE, Qin. **Influences by air voids on fatigue life of asphalt mixture based on discrete element method.** Construction and Building Materials. V. 126. P. 785-799. 2016.

MANGIAFICO, Salvatore. **Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and correspondig binder blends.** l'École Nationale des Travaux Public de l'État. Tese de doutorado. 336 p. França, 2014.

MARCON, Matheus F. **Estudo e comparação do desempenho mecânico e reológico entre concretos asfálticos modificados por polímeros SBS, borracha moída de pneu e nanomateriais.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, 2017.

MARTINS, Adriana T. **Contribuição para a validação do ensaio de resistência ao dano por fadiga para ligantes asfálticos.** 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2014.

MATEOS, Angel; HARVEY, John. **Laboratory Evaluation of the Mechanical Properties of Asphalt Concrete Reinforced with Aramid Synthetic Fibers.** Research Report UCPRC-RR-2019-1. University of California. 2019.

MATOS, Caroline F. **Materiais nanocompósitos multifuncionais formados entre nanotubos de carbono e látices poliméricos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná - UFPR. Curitiba, 2011.

MELO, João V. S. **Desenvolvimento e Estudo do Comportamento Reológico e Desempenho Mecânico de Concretos Asfálticos Modificados com Nanocompósitos.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, Brasil. 2014.

MELO, João V. S.; TRICHÊS, Glicério. **Evaluation of properties and fatigue llife estimation of asphalt mixture modified by organophilic nanoclay.** Construction and Building Materials. V. 140. P. 364-373. 2017.

MENEZES, Antônio A. S.; MOURA, Fábio R.; FARIAS, Tácito A.; ARAUJO, Paulo J. L. **A importância dos transportes para o desenvolvimento econômico: uma análise econométrica dos custos de frete do transporte rodoviário.** Cadernos de Graduação – Ciências Exatas e Tecnológicas. V. 2. P. 155-164. 2014.

MENOZZI, Alessandro; GARCÍA, Alvaro; PARTL, Manfred N.; TEBALDI, Gabriele; SCHUETZ, Philipp. **Induction healing of fatigue damage in asphalt test samples.** Construction and Building Materials. V. 74. P. 162-168. 2015.

MOHAMMED; Monketh; PARRY, Tony; THOM, Nick; GRENFELL, James. **Microstructure and mechanical properties of fibre reinforced asphalt mixtures.** Construction and Building Materials. V. 240. 2020.

MORENO-NAVARO, Fernando; SOL-SÁNCHEZ, Miguel; RUBIO-GÁMEZ, Carmen. **Exploring the recovery of fatigue damage in bituminous mixtures: the role of healing.** Road Materials and Pavement Design. 2015.

MOTLAGH, A. A.; KIASAT, A.; MIRZAEI, E.; BIRGANI F.O. **Bitumen Modification Using Carbon Nanotubes**. World Applied Sciences Journal. V. 18. P. 594-599. 2012.

MOURA, Edson. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório**. Tese de Doutorado. 299 p. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

NAN, Ce-Wen; BIRRINGER, R.; CLARKE, D. R.; GLEITER, H. **Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance**. Journal of Applied Physics. Agosto, 1998.

NERES, Renata A. **Caracterização Térmica de Amostras de Esponja Sintética Dupla Face e Palha de Aço**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 78 p. São Paulo, 2014.

NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; GARCÍA, Álvaro. **Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating**. Materials Design. V. 106. P. 404-414. 2016.

NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; GONZÁLES, A.; CONCHA, J.L.; GONZALES-TORRE, I.; SCHLANGEN, E. **Effect of metallic waste addition on the electrical, thermophysical and microwave crack-healing properties of asphalt mixtures**. Construction and Building Materials. V.187. P.1039-1050. 2018.

NORAMBUENA-CONTRERAS, José; CONCHA, José L. **Self-healing Of Asphalt Mixtures via Microwave Heating**. In **ISAP 2016 Symposium, 2016**. United States, 2016.

PAMULAPATI, Yashwanth; ELSEIFI, Mostafa A.; COOPER III, Samuel B.; MOHAMMAD, Louay N. **Evaluation of self-healing of asphalt concrete through induction heating and metallic fibers**. Construction and Building Materials. V. 146. P. 66-75. 2017.

PÉREZ, Ignácio; AGZENAI, Yahya; POZUELO, Javier; SANZ, Javier; BASELGA, Juan; GARCÍA, Antonio; PÉREZ, Vicente. **Self-healing of asphalt mixes, containing conductive modified bitumen, using microwave heating**. Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress. Praga, 2016.

PÉREZ, Jahel Sarvia Ledezma. **Avaliação do Desempenho de Pavimentos Flexíveis dos Segmentos Monitorados de Urubici e Itapoá**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, Brasil. 2016.

PRAGER, Stephen; TIRRELL; Matthews. **The healing process at polymer-polymer interface**. The Journal of Chemical Physics. New York, United States. July, 1981.

PRONK, Adriaan C. **Partial Healing in Fatigue Tests on Asphalt Specimens**. V. 2. P. 433-445. 2001.

PUROHIT, Rajesh; PUROHIT, Kuldeep; RANA, Saraswati; RANA, R. S.; PATEL, Vivek. **Carbon Nanotubes and Their Growth Method**. 3rd International Conference on Materials Processing and Characterisation (ICMPC). Seoul, South Korea. 2014.

QIU, H.; YANG, J. **Structure and Properties of Carbon Nanotubes**. Industrial Applications of Carbon Nanotubes, 2017.

QIU, J; Van de VEN, M.F.C; WU, S; YU, J; MOLENAAR, A.A.A. **Investigating the Self Healing Capability of Bituminous Binders**. Road Materials and Pavement Design. V.10. P. 81-94. 2009.

QIU, Jian. **Self Healing of Asphalt Mixtures: Towards a Better Understanding of the Mechanism**. Doctoral Thesis. Delft University of Technology. Delft, Netherlands. 2012.

RAFIQUE, Muhammad M. A.; IQBAL, Javed. **Production of Carbon Nanotubes by Different Routes – A Review**. Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences. V. 1. P. 29-34. 2011.

RILEM, Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages. **EHA: Engineered healing of asphalt concrete**. Disponível em: <<https://www.rilem.net/groupe/eha-engineered-healing-of-asphalt-concrete-315>>. Acesso em: junho de 2018.

ROQUE, Reynaldo; SIMMS, Reebie; CHEN, Yu; KOH, Chulseung; LOPP, George. **Development of a Test Method That Will Allow Evaluation and Quantification of the Effects of Healing on Asphalt Mixture**. Florida Department of Transportation. Florida, United States. April, 2012.

SALIH, S.; GÓMEZ-MEIJIDE, B.; ABOUFOUL, M.; GARCIA, A. **Effect of porosity on infrared healing of fatigue damage in asphalt**. Construction and Building Materials. 2018.

SANTAGATA, Ezio; BAGLIERI, Orazio; TSANTILIS, Lucia; DALMAZZO, Davide. **Rheological Characterization of Bituminous Binders Modified with Carbon Nanotubes**. 5th International Congress – Sustainability of Road Infrastructures. P. 546-555. 2012.

SHEN, Shihui; CHIU, Ho-Ming; HUANG, Hai. **Characterization of Fatigue and Healing in Asphalt Binders**. Journal of Materials in Civil Engineering. P. 846-852. September, 2010.

SHEN, Shihui; SUTHARSAN, Thiyagarajah. **Quantification of cohesive healing of asphalt binder and its impact factors based on dissipated energy analysis**. Road Materials and Pavement Design. P. 525-546. 2011.

SOUSA, Jorge B.; PAIS, Jorge C.; PRATES, Manuel; BARROS, Rui; LANGLOIS, Pierre; LECLERC, Anne-Marie. **Effect of Aggregate Gradation on Fatigue Life of Asphalt Concrete Mixes**. Transportation Research Record. V. 1630. January, 1998.

STEYN, W.; BOSMAN, T. E.; GALLE, S.; HEERDEN, J. V. **Evaluatin the Properties of Bitumen Stabilized with Carbon Nanotubes**. Advanced Materials Research. Suíça, 2013.

SU, Jun-Feng; QIU, Jian; SCHLANGEN, Erik; WANG, Ying-Yuan. **Experimental investigation of self-healing behavior of bitumen/microcapsule composites by a modified beam on elastic foundation method**. Materials and Structures. P. 4067-4076. 2015.

SUGANDH, Rajpal; ZEA, Manuel; TANDOM, Vivek; SMIT, Andre; PROZZI, Jorge. **Performance Evaluation of HMA Consisting of Modified Asphalt Binder**. Project Number 0-4824. Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration. Texas, 2007.

SUN, Daquan; LIN, Tianban; ZHU, Xinhui; CAO, Linhui. **Calculation and evaluation of activation energy as a self-healing indicatioin of asphalt mastic**. Construction and Building Materials. P. 431-436. 2015.

TABAKOVIĆ, Ademir; SCHLANGEN, Erik. **Self-Healing Technology for Asphalt Pavements**. Advances in Polymer Science. 2015.

TEIZER, Jochen; VENUGOPAL, Manu; TEIZER, Winfried; FELKL, Jakob. **Nanotechnology and Its Impact on Construction: Bridging the Gap between Researchers and Idustry Professionals**. Journal of Construction Engineering and Management. V. 138. P. 594-604. 2012.

VAN DEN BERGH, Win. **The Effect of Ageing on the Fatigue and Healing Properties in Bitumen Mortars**. Doctoral Thesis. Delft University of Technology. Delft, Netherlands. 2011.

WANG, Shiren; QIU, Jingjing. **Enhancing thermal conductivity of glass fiber/polymer composites through carbon nanotubes incorporation**. Composites: Part B. V. 41. P. 533-536. 2010.

WANG, Xinyu; GUO, Yandong; SU, Jufeng; ZHANG, Xiaolong; WANG, Yingyuan; TAN, Yiqiu. **Fabrication and Characterization of Novel Electrothermal Self-Healing Microcapsules with Graphene/Polymer Hybrid Shells for Bitumenious Material**. Nanomaterials. 2018.

WANG, Zigeng; DAI, Qingli; GUO, Shuaicheng. **Microwave-healing performance of modified asphalt mixtures with flake graphite and exfoliated graphite nanoplatelet**. Construction and Building Materials. 2017.

WANG, Zigeng; DAI, Qingli; GUO, Shuaicheng; WANG, Ronghua; YE, Mingxiao; YAP, Yoke Khin. **Experimental investigation of physical properties and accelerated sunlight-healing performance of flake graphite and exfoliated graphite nanoplatelet modified asphalt materials.** Construction and Building Materials. 2017.

WILLIAMS, D.; LITTLE, D.N.; LYTTON, R.L.; KIM, Y.R.; KIM, Y. **Microdamage Healing in Asphalt and Asphalt Concrete, Volume II: Laboratory and Field Testing to Assess and Evaluate Microdamage and Microdamage Healing.** Research Report 7229. Texas Transportation Institute. Texas, United States. June, 2001.

WOOL, R.P.; O'CONNOR, K.M. **A theory crack healing in polymers.** Journal of Applied Physics. United States. October, 1981.

WU, Shao-peng; LU, Xiao-ming; YE, Qun-shan; LI, Ning. **Self-monitoring electrically conductive asphalt-based composite containing carbon fillers.** Transactions of Nonferrous Metals Society of China. V. 16. P. s512-s516. 2006.

WU, Shaopeng; MO, Liantong; SHUI, Zhonghe; CHEN, Zheng. **Investigation of the conductivity of asphalt concrete containing conductive fillers.** Carbon. V. 43. P. 1358-1363. 2006.

WU, Shaopeng; YE, Qunshan; YUE, Hongbo. **Effects of Fibers on the Dynamic Properties of Asphalt Mixtures.** Journal of Wuhan University of Technology- Materials Science. V. 22. P. 722-726. 2007.

XIAO, Dong. **State-of-the-art and Prospect for Self-Healing Asphalt Concrete.** AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics. 2017.

XIE, Wei; CASTORENA, Cassie; WANG, Chao; KIM, Richard Y. **A framework to characterize the healing potential of asphalt binder using the linear amplitude sweep test.** Construction and Building Materials. V. 154. P. 771-779. 2017.

YANG, J.; QIU, H. Structure and Properties of Carbon Nanotubes. Chapter 2. **Industrial Applications of Carbon Nanotubes.** University of Shanghai for Science and Technology. Shanghai, China. 2017.

YANG, Jun-Mo; KIM, Jin-Kook; YOO, Doo-Yeol. **Effects of amorphous metallic fibers on the properties of asphalt concrete.** Construction and Building Materials. P. 176-184. Outubro, 2016.

YOO, Doo-Yeol; KIM, Soonho; KIM, Min-Jae; KIM, Doyeong; shin, Hyun-Oh. **Self-healing capability of asphalt concrete with carbon-based materials.** Journal of Materials Research and Technology. 2018.

YOU, Zhanping; MILLS-BEALE, Julian; FOLEY, Justin M.; ROY, Samit; ODEGARD, Gregory M.; DAI, Qingli; GOH, Shu W. **Nanoclay-modified asphalt materials:**

Preparation and characterization. Construction and Building Materials. P. 1072–1078. 2011.

ZEIADA, W. A.; KALOUSH, K. E.; UNDERWOOD, B. S.; MAMLOUK, M. S. **Effect of air void and Asphalt Content on Fatigue Damage Using the Viscoelastic Continuum Damage Analysis.** Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements. P. 1122-1133. 2013.

ZEIADA, W. A.; UNDERWOOD, B. S.; KALOUSH, K. E. **Impact of asphalt concrete fatigue endurance limit definition on pavement performance prediction.** International Journal of Pavement Engineering. V. 18. P. 945-956. 2016.

ZHANG, Jizhe; LI, Hongyin; LIU, Peng; LIANG, Ming; JIANG, Hongguang; YAO, Zhanyong; AIREY, Gordon. **Experimental Exploration of Influence of Recycled Polymer Components on Rutting Resistance and Fatigue Behavior of Asphalt Mixtures.** Journal of Materials in Civil Engineering. V. 32. 2020.

ZHU, Xingyi; CAI, Yongsheng; ZHONG, Sheng; ZHU, Jun; ZHAO, Hongduo. **Self-healing efficiency of ferrite-filled asphalt mixture after microwave irradiation.** Construction and Building Materials. V. 141. P. 12-22. 2017.

APÊNDICE 01 – GRÁFICOS DE DOSAGEM DA MISTURA REFERÊNCIA

Gráfico 1 - Volume de vazios (V_v) relativo à dosagem da mistura asfáltica referência.

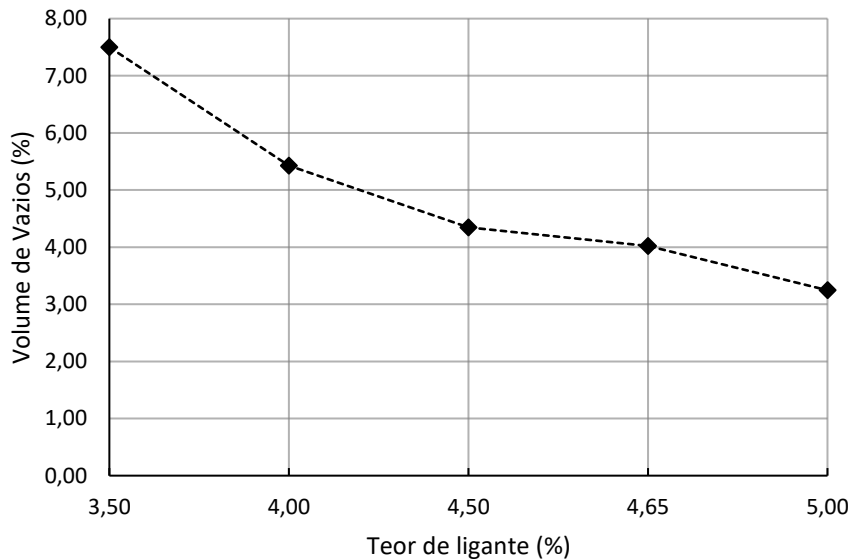


Gráfico 2 - Relação betume vazios (RBV) para os diferentes teores de ligante asfáltico avaliados na mistura de referência.

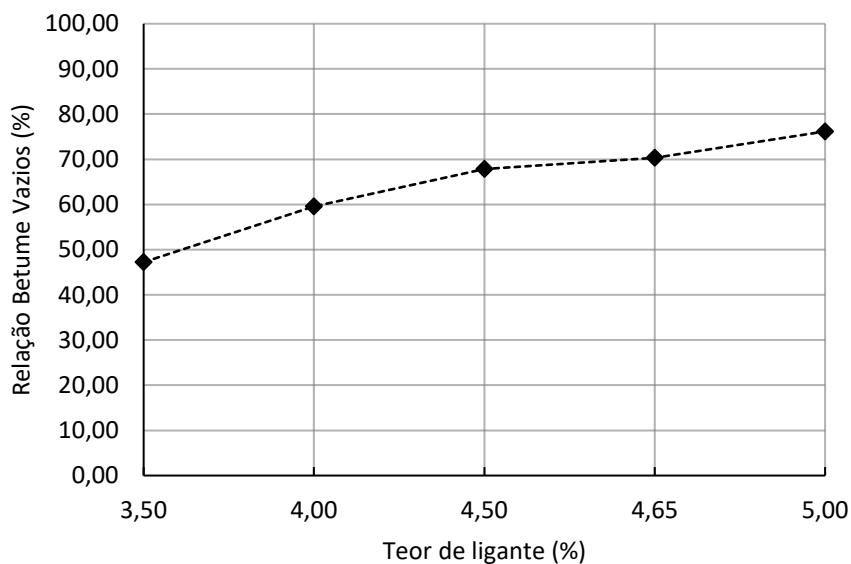


Gráfico 3 - Vazios do agregado mineral (VAM) para as variações no teor de ligante asfáltico propostas para a mistura de referência.

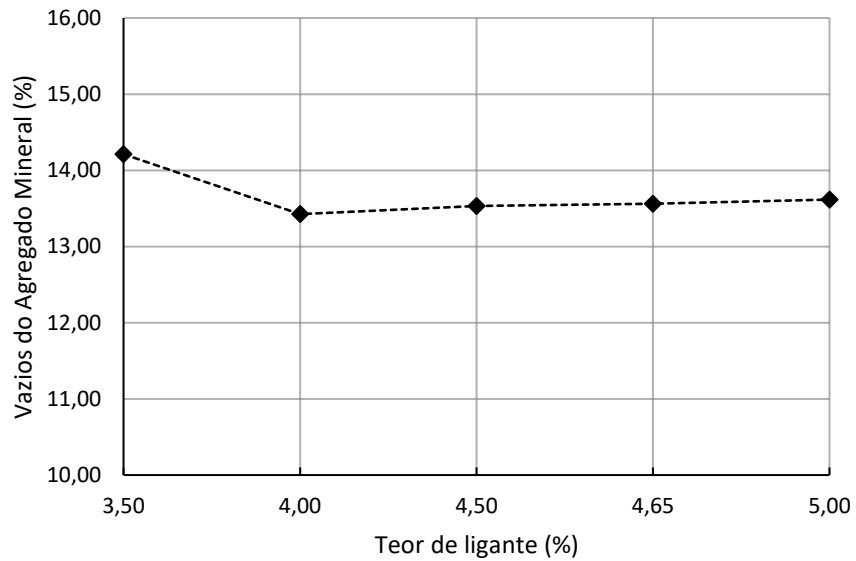
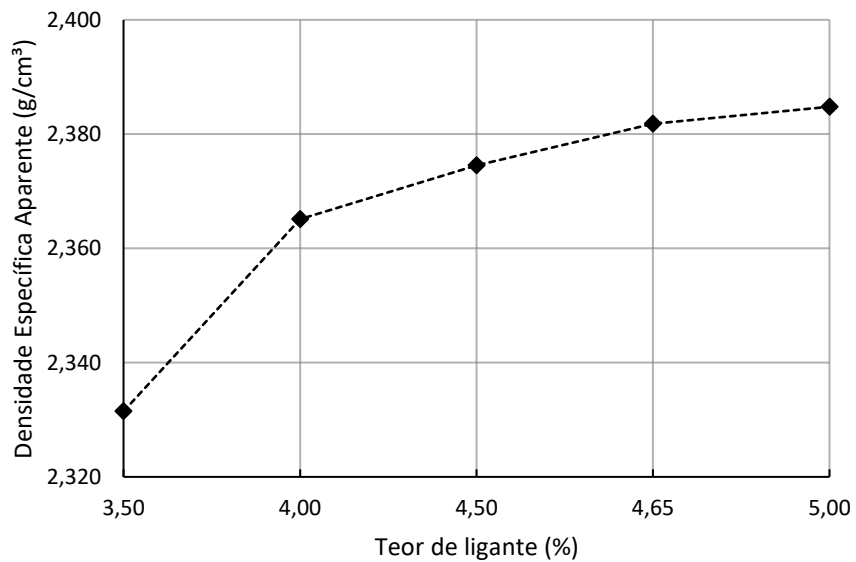


Gráfico 4 - Densidade específica aparente dos corpos de prova da mistura asfáltica de referência para os teores investigados.



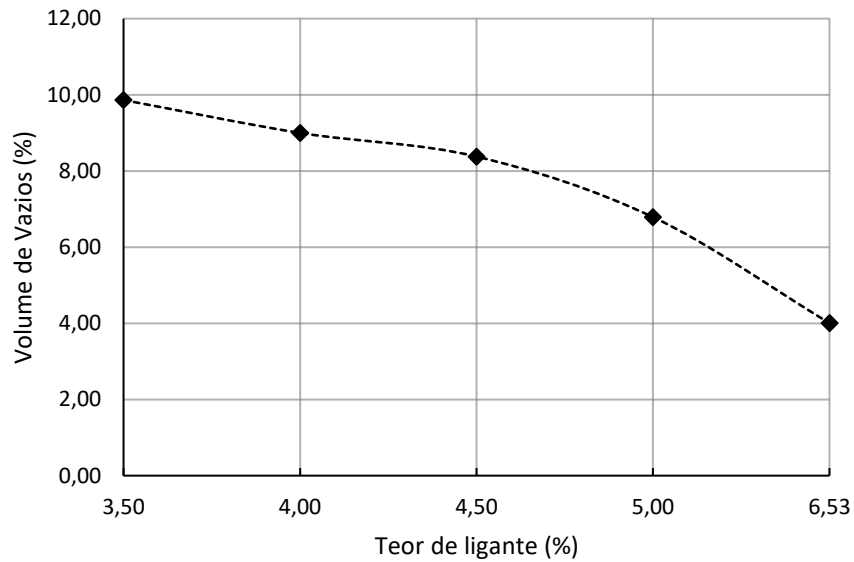
APÊNDICE 02 – GRÁFICOS DE DOSAGEM DA MISTURA MODIFICADAGráfico 5 - Volume de vazios (V_v) relativo à dosagem da mistura asfáltica modificada.

Gráfico 6 - Relação betume vazios (RBV) para os diferentes teores de ligante asfáltico avaliados na mistura modificada.

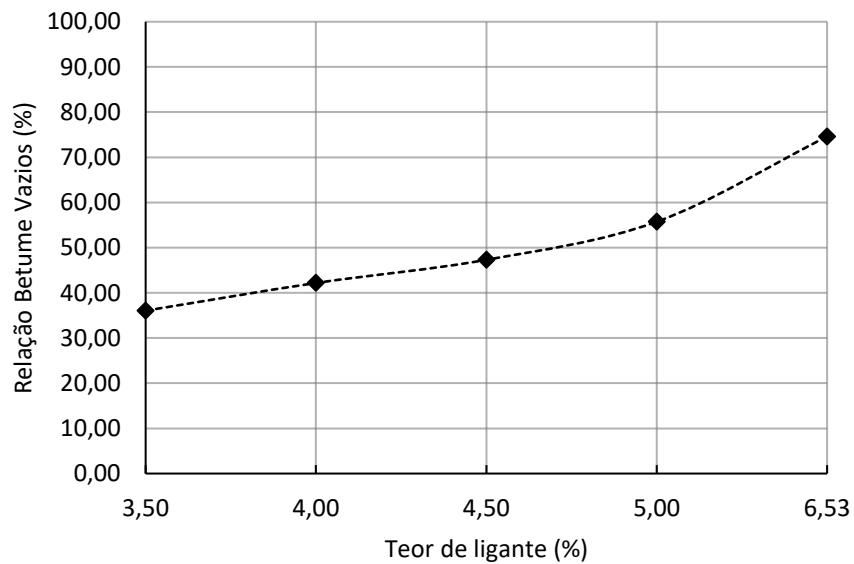


Gráfico 7 - Vazios do agregado mineral (VAM) para as variações no teor de ligante asfáltico propostas para a mistura modificada.

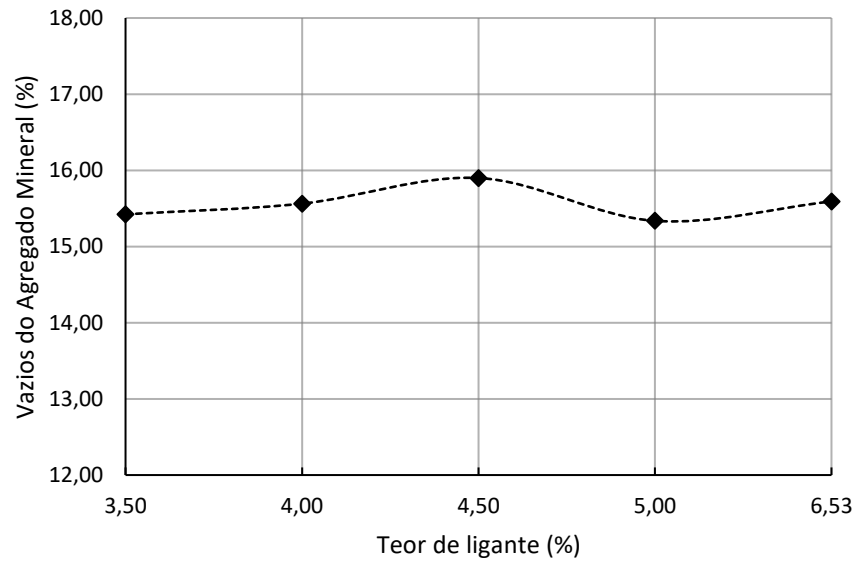


Gráfico 8 - Densidade específica aparente dos corpos de prova da mistura asfáltica modificada para os teores investigados.

