MARINA FREDERICH DE OLIVEIRA

**Análise de durabilidade e textura superficial em restaurações de
camada de rolamento de pavimentos asfálticos**

**São Paulo
2021**

MARINA FREDERICH DE OLIVEIRA

**Análise de durabilidade e textura superficial em restaurações de camada de
rolamento de pavimentos asfálticos**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
como requisito parcial para obtenção do
grau de Mestre em Ciências.

Área de concentração:
Engenharia de Transportes

Orientadora: Profa. Kamilla Vasconcelos

**São Paulo
2021**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador

São Paulo, 22 de janeiro de 2021

Assinatura do autor: Marina Frederich de Oliveira

Assinatura do orientador: [assinatura]

Oliveira, Marina Frederich de

Análise de durabilidade e textura superficial em restaurações de camada de rolamento de pavimentos asfálticos / M. F. Oliveira -- versão corr. -- São Paulo, 2021.

164 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Pavimentos Asfálticos 2.Comportamento Mecânico 3.Textura Superficial 4.Restaurações I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, porto-seguro da vida toda. Obrigada pelo apoio, pela base sólida e pelo amor.

Agradeço à minha orientadora e amiga, professora Kamilla Vasconcelos, profissional dedicada, humana e de energia sem igual. Obrigada por guiar, aconselhar e estar presente.

Agradeço ao meu coorientador e amigo, professor Iuri Bessa. Obrigada por partilhar seu conhecimento e ser parceiro em cada uma das etapas deste trabalho, com prontidão em ajudar.

Agradeço a orientadora do projeto, professora Liedi Bernucci. Obrigada pela oportunidade de conviver e pelo constante suporte.

Agradeço a cada um dos alunos do LTP que foram parceiros para todas as horas e alegraram o convívio diário. Obrigada, André Kazuo, André Rosa, Andreia Cargnin, Beatriz Biseski, Camila Christine, Fernanda Gadler, Fernanda Carvalho, Guilherme Castro, Guilherme Pereira, Gustavo Pinheiro, João Paulo Barbosa, João Paulo Meneses, Julia Rodrigues, Laura Mazzoni, Larissa Zipoli, Leidy Espinosa, Lucas Andrade, Marcia Midori, Matheus Gaspar, Paulo Pereira, Rafael Vicente, Raíssa Rodrigues, Talita Alves e Zila Mascarenhas.

Agradeço aos alunos de iniciação científica que foram essenciais para a realização dos ensaios laboratoriais deste trabalho, Guilherme Martins e Rodrigo Vasconcelos.

Agradeço aos integrantes do LTP pelo convívio diário e ajuda em todas as dificuldades. Obrigada, Diomária Santos, Edson Moura, Erasmo Alves, Higor Moreira, José João Pires, Robson Costa, Rosângela Motta e Vanderlei Dias.

Agradeço as minhas companheiras de apartamento durante este período em São Paulo. Obrigada Raisa Calil e Winne Carvalho por partilharem suas vidas comigo.

RESUMO

Uma estrutura de pavimento deve ser dimensionada de modo a garantir trafegabilidade, segurança e conforto aos usuários da via. A garantia destes três parâmetros deve ser assegurada sob a ação do tráfego e das condições climáticas a que a rodovia é exposta. A falta ou inadequada manutenção da estrutura pode acelerar o desenvolvimento de defeitos, especialmente trincamento por fadiga e deformação permanente. A evolução destes defeitos torna necessária a restauração da rodovia, de modo que as intervenções realizadas na camada de revestimento asfáltico garantam a trafegabilidade. O processo de restauração conta com etapa de projeto, onde são selecionados os materiais e realizada a dosagem e dimensionamento; e de execução, onde ocorre a usinagem (sujeita a erros de teor de ligante e granulometria) e compactação da camada (diretamente ligada ao volume de vazios da camada final). Ambas as etapas precisam ser eficientes para que o revestimento não apresente defeitos precocemente. Além disso, outro fator que pode comprometer a segurança dos usuários da via é a textura superficial da camada, responsável pela aderência entre pneu e pavimento, também influenciada pelas características da mistura. Assim, este estudo analisou o efeito da variação da distribuição granulométrica e do volume de vazios de misturas asfálticas quanto ao comportamento mecânico e à textura superficial, tanto em laboratório quanto em campo. Foram consideradas quatro granulometrias (contínua, semi-descontínua, descontínua e aberta), e duas volumetrias para as granulometrias contínua e descontínua. Em laboratório, as misturas foram caracterizadas quanto às propriedades viscoelásticas lineares, comportamento quanto à deformação permanente e à fadiga, macrotextura e microtextura. A análise laboratorial contou também com estudo do processo de compactação das amostras, propondo um novo método com vibração. Em campo, o monitoramento dos trechos experimentais foi feito com extração de corpos de prova de pista, utilizados para caracterização de rigidez e da estrutura interna; e com levantamentos deflectométricos e de defeitos. Verificou-se que o processo de compactação interfere no comportamento mecânico quanto à deformação permanente e à macrotextura das amostras. A rigidez de misturas compactadas em laboratório e de amostras extraídas de pista evidenciam pouca variação de acordo com as mudanças de granulometria e volumetria estudadas. A microtextura também não foi afetada por essas variáveis. Todas as misturas apresentaram comportamento adequado em laboratório quanto à deformação permanente, como indicado pela metodologia FAD, apesar de serem consideradas inadequadas pelo método Bailey. O teor de ligante asfáltico apresentou maior influência nos resultados de fadiga do que a granulometria das misturas. Em campo, foi encontrada forte relação entre teor de ligante asfáltico e afundamento de trilha de roda. A mistura semi-descontínua apresentou suscetibilidade à ocorrência de trincas. Foi ainda observada relação entre descontinuidade da granulometria e mudança da macrotextura com a ação do tráfego.

Palavras-chave: Pavimentos Asfálticos. Comportamento Mecânico. Textura Superficial. Restaurações.

ABSTRACT

A pavement structure must be designed to guarantee trafficability, safety and comfort to the highway's users. These three parameters must be ensured even with traffic and climatic conditions exposure. The lack or inadequate maintenance of the structure might accelerate the distresses development, such as fatigue cracking and permanent deformation. The evolution of these distresses causes the need of highway restoration, with interventions that may renew the highway's trafficability. The restoration process consists in project, with material selection, mixture and pavement design; and construction, with materials production in plant (susceptible to binder content or aggregate gradation errors) and compaction (connected to air voids content). Both stages need to be efficient aiming to guarantee that distresses will not appear precociously. Besides, the surface texture (responsible for adherence between tire and pavement and influenced by asphalt mixture characteristics) also might compromise the highway safety. Hence, this study analyzed the variation effect of aggregate gradation and air voids content, considering mechanical behavior and surface texture, in laboratory and in test section. Four types of aggregate gradation were considered (continuous, semi-discontinuous, discontinuous and open-graded), and two air voids content to continuous and semi-discontinuous mixtures. In laboratory, the asphalt mixtures were characterized by its linear viscoelastic properties, permanent deformation and fatigue behavior, macrotexture and microtexture. The laboratory analysis also considered a sample compaction study, proposing a new method including vibration process. In test section, samples were extracted to characterize stiffness and internal structure; deflection tests and distress monitoring were also made. The results showed that the compaction process influences the permanent deformation and macrotexture behavior of the samples. The stiffness of samples produced in laboratory and extracted from the test section did not present variation according to air voids and aggregate gradation variation studied. The microtexture was also not influenced by these variables. All the asphalt mixtures presented adequate behavior in laboratory with respect to permanent deformation, as indicated by FAD methodology, however, were considered inadequate by Bailey method. The binder content showed more influence in the fatigue results than the aggregate gradation of asphalt mixtures. In test section, the rutting and binder content presented a strong relation. The semi-discontinuous mixture presented susceptibility to fatigue. The aggregate gradation discontinuity showed a relation with macrotexture evolution along traffic.

Keywords: Asphalt Pavement. Mechanical Behavior. Surface Texture. Restoration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma da dissertação	19
Figura 2 – Características da textura superficial com respectivas faixas de comprimento e amplitude de onda	31
Figura 3 – Faixa de influência da microtextura e macrotextura	33
Figura 4 – Localização do trecho experimental e da Usina em relação a Curitiba	37
Figura 5 – Localização dos segmentos do trecho experimental	37
Figura 6 – Granulometria dos agregados e fíler	39
Figura 7 – Processo de fabricação das amostras (a) moldagem da amostra (b) colocação da amostra no equipamento (c) ajuste do gap	41
Figura 8 - Determinação da zona viscoelástica linear do ligante FLEXPAVE 60/85 (a) amostra não-envelhecida (b) amostra envelhecida após o RTFOT (c) amostra envelhecida após RTFOT+PAV a 16°C (d) amostra envelhecida após RTFOT+PAV a 37°C	42
Figura 9 – Parâmetro reológico $ G^* /\sin\delta$ em diferentes temperaturas para o ligante não-envelhecido	43
Figura 10 – Parâmetro reológico $ G^* /\sin\delta$ em diferentes temperaturas para o ligante envelhecido em curto prazo	44
Figura 11 – Parâmetro reológico $ G^* \times \sin\delta$ em diferentes temperaturas para o CAP envelhecido em longo prazo.....	45
Figura 12 – Curvas mestras do CAP (a) módulo de cisalhamento dinâmico e (b) ângulo de fase.....	46
Figura 13 – Resultados do ensaio de MSCR para o ligante asfáltico.....	47
Figura 14 – Resultados do ensaio de LAS em diferentes temperaturas (a) evolução do ensaio e (b) curva de fadiga	49
Figura 15 – Curva C vs. S para o ligante asfáltico	50
Figura 16 – Curvas granulométricas das misturas asfálticas: (a) Contínua; (b) Semi-descontínua; (c) Descontínua; (d) Aberta.....	51
Figura 17 – Granulometrias de projeto	52
Figura 18 – Diagrama de interação entre peneiras	55
Figura 19 – Etapas de execução do trecho experimental: (a)(b) Fresagem do revestimento antigo; (c)(d) Limpeza da superfície fresada; (e) Pintura de ligação; (f)	

lançamento da mistura asfáltica por vibroacabadora; (g) Compactação por rolo de pneus; (h) Compactação por rolo liso vibratório*	56
Figura 20 – Croqui do trecho experimental	58
Figura 21 – Estrutura remanescente: (a) caracterização das camadas; (b) poço de inspeção	58
Figura 22 – Coleta de amostras: (a) massa asfáltica da vibroacabadora; (b) corpos de prova do revestimento compactado	59
Figura 23 – Ensaio para determinação do teor de ligante asfáltico da mistura: (a) mistura no início do ensaio; (b) agregado após ignição	60
Figura 24 – Curvas granulométricas das misturas <i>as built</i> comparadas as de projeto: (a) Contínua; (b) Semi-descontínua; (c) Descontínua; (d) Aberta	61
Figura 25 – Determinação da densidade máxima medida: (a) Amostra coberta com água destilada; (b) Kitassato com amostra em processo de agitação; (c) Preenchimento do kitassato com água destilada	62
Figura 26 – Determinação do volume de vazios (a) Amostras extraídas de campo (b) Pesagem hidrostática de amostra	63
Figura 27 – Ensaio de Módulo Dinâmico	66
Figura 28 – Curvas mestras do módulo dinâmico para diferentes volumetrias das misturas: (a) CA (b) SD (c) GAP	67
Figura 29 – Curvas mestras do módulo dinâmico para diferentes granulometrias	69
Figura 30 – Curvas mestras do ângulo de fase para diferentes volumetrias das misturas: (a) CA (b) SD (c) GAP	70
Figura 31 – Curvas mestras de ângulo de fase de diferentes granulometrias	71
Figura 32 – Plano Cole-Cole para diferentes volumetrias das misturas: (a) CA (b) SD (c) GAP	72
Figura 33 – Plano Cole-cole para diferentes granulometrias	74
Figura 34 – Black Space para diferentes volumetrias das misturas: (a) CA (b) SD (c) GAP	75
Figura 35 – Black Space para diferentes granulometrias	76
Figura 36 – Compactação de amostras em laboratório: (a) método convencional com pneu liso; (b) método com vibração, motovibrador em cima de placa metálica (c) motovibrador na etapa final, diretamente na amostra	78

Figura 37 – Simulador de tráfego LCPC: (a) Uma das amostras posicionada com pneu suspenso (b) Medição de afundamentos.....	80
Figura 38 – Resultados de afundamento de trilha de roda para o par de amostras da mistura do tipo concreto asfáltico para ambos método de compactação (a) $V_v = 2,8\%$ (b) $V_v = 4,0\%$; (c) $V_v = 6,8\%$	80
Figura 39 – Resultados de afundamento de trilha de roda para o trio de amostras da mistura do tipo concreto asfáltico para $V_v = 2,8\%$; $V_v = 4,0\%$; $V_v = 6,8\%$ em métodos de compactação (a) Vibrado (b) Padrão.....	82
Figura 40 – Resultados de afundamento de trilha de roda para o par de amostras da mistura do tipo semi-descontínua para ambos método de compactação (a) $V_v = 3,0\%$ (b) $V_v = 4,0\%$; (c) $V_v = 6,5\%$	84
Figura 41 – Resultados de afundamento de trilha de roda para o trio de amostras da mistura do tipo semi-descontínua para $V_v = 3,0\%$, $V_v = 4,0\%$, $V_v = 6,5\%$ em métodos de compactação (a) Vibrado (b) Padrão.....	86
Figura 42 – Resultados de afundamento de trilha de roda para o par de amostras da mistura do tipo gap-graded para ambos métodos de compactação.....	88
Figura 43 – Resultados de afundamento de trilha de roda para o par de amostras de todas as misturas para método de compactação (a) vibrado (b) padrão	89
Figura 44 – Equipamento para ensaio de fadiga.....	92
Figura 45 – Resultados de fadiga para as amostras de laboratório	92
Figura 46 – Ensaio de mancha de areia: (a) Procedimento de espalhamento (b) Círculo final após espalhamento	94
Figura 47 – Valores de macrotextura para amostras de laboratório com diferentes granulometrias.....	95
Figura 48 – Valores de macrotextura para amostras de laboratório com diferentes valores de volume de vazios (a) Concreto asfáltico (b) Semi-descontínua	97
Figura 49 – Evolução dos valores de macrotextura com simulador de tráfego	98
Figura 50 – Resultados de macrotextura para diferentes paradas no simulador de tráfego considerando variação de volumetria das amostras (a) Concreto asfáltico (b) Semi-descontínua	100
Figura 51 – Medição de microtextura: (a) Equipamento de Pêndulo Britânico; (b) Realização do ensaio	103
Figura 52 – Valores de microtextura para as amostras de laboratório	104

Figura 53 – Valores de microtextura para amostras de laboratório com diferentes valores de volume de vazios (a) Concreto asfáltico (b) Semi-descontínua	105
Figura 54 – Evolução dos valores de microtextura após simulador de tráfego	107
Figura 55 – Resultados de microtextura para diferentes paradas no simulador de tráfego considerando variação de volumetria das amostras (a) Concreto asfáltico (b) Semi-descontínua	108
Figura 56 – Ensaio de Módulo de Resiliência: (a) Aparato na MTS (b) Amostra posicionada	111
Figura 57 – Módulo de Resiliência Instantâneo e Total dos CPs extraídos de campo	111
Figura 58 – Quantidade de poros de acordo com a profundidade da amostra (a) CA+ (b) CA- (c) SD+ (d) SD- (e) GAP (f) CPA	114
Figura 59 – Gráfico de relação entre volume e diâmetro médio de poros (a) CA+ (b) CA- (c) SD+ (d) SD- (e) GAP (f) CPA.....	116
Figura 60 – Volume de poros em função do diâmetro médio dos poros para determinada amostra de cada mistura.	118
Figura 61 – Deflexões máximas para os tempos de 0, 6 e 12 meses: (a) eixo (b) trilha de roda externa	120
Figura 62 – Bacias deflectométricas para 0 meses (Junho/2018) (a) eixo (b) trilha de roda externa	121
Figura 63 – Bacias deflectométricas para 6 meses (Dezembro/2018) (a) eixo (b) trilha de roda externa	123
Figura 64 – Bacias deflectométricas para 12 meses (Junho/2019) (a) eixo (b) trilha de roda externa	124
Figura 65 – Evolução do ATR de 4 e 12 meses após liberação do tráfego.....	125
Figura 66 – ATR com um ano de liberação ao tráfego em relação a: (a) volume de vazios; (b) teor de ligante asfáltico	127
Figura 67 – Evolução da área trincada nos tempos de 4 e 12 meses.....	128
Figura 68 – Evolução da irregularidade longitudinal nos tempos de 0, 6 e 12 meses	129
Figura 69 – Textura superficial das misturas no tempo 0: (a) CA+ (b) CA- (c) SD+ (d) SD- (e) GAP (f) CPA	131
Figura 70 – Medição de macrotextura em campo	132

Figura 71 – Valores de macrotextura inicial para cada mistura asfáltica (tempo 0)	132
Figura 72 – Evolução de valores de macrotextura de 0, 4 e 12 meses.....	133
Figura 73 – Relação entre valores de macrotextura e volume de vazios das misturas	134
Figura 74 – Redução de valores de macrotextura de 0 a 12 meses	135
Figura 75 – Localização de cada segmento.....	136
Figura 76 – Valores de macrotextura com diferentes métodos de medição para o tempo inicial das misturas	137
Figura 77 – Medição de microtextura em campo	138
Figura 78 – Valores de microtextura no tempo inicial para cada mistura asfáltica..	138
Figura 79 – Evolução do valor de microtextura nos tempos de 0, 4 e 12 meses	139
Figura 80 – Bacias de deflexão para o tempo 0 (junho/2018) da mistura CA+	156
Figura 81 – Bacias de deflexão para o tempo 0 (junho/2018) da mistura CA-	156
Figura 82 – Bacias de deflexão para o tempo 0 (junho/2018) da mistura CPA.....	157
Figura 83 – Bacias de deflexão para o tempo 0 (junho/2018) da mistura SD+	157
Figura 84 – Bacias de deflexão para o tempo 0 (junho/2018) da mistura SD-	158
Figura 85 – Bacias de deflexão para o tempo 0 (junho/2018) da mistura GAP.....	158
Figura 86 – Bacias de deflexão para o tempo 6 (dezembro/2018) da mistura CA+	159
Figura 87 – Bacias de deflexão para o tempo 6 (dezembro/2018) da mistura CA-	159
Figura 88 – Bacias de deflexão para o tempo 6 (dezembro/2018) da mistura CPA	160
Figura 89 – Bacias de deflexão para o tempo 6 (dezembro/2018) da mistura SD+	160
Figura 90 – Bacias de deflexão para o tempo 6 (dezembro/2018) da mistura SD-	161
Figura 91 – Bacias de deflexão para o tempo 6 (dezembro/2018) da mistura GAP	161
Figura 92 – Bacias de deflexão para o tempo 12 (junho/2019) da mistura CA+	162
Figura 93 – Bacias de deflexão para o tempo 12 (junho/2019) da mistura CA-	162
Figura 94 – Bacias de deflexão para o tempo 12 (junho/2019) da mistura CPA.....	163
Figura 95 – Bacias de deflexão para o tempo 12 (junho/2019) da mistura SD+	163
Figura 96 – Bacias de deflexão para o tempo 12 (junho/2019) da mistura SD-	164
Figura 97 – Bacias de deflexão para o tempo 12 (junho/2019) da mistura GAP.....	164

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização dos agregados.....	38
Tabela 2 – Massa específica dos agregados e fíler	38
Tabela 3 – Ensaio convencionais de caracterização do ligante asfáltico	40
Tabela 4 – Classificação do tráfego de acordo com o Superpave	48
Tabela 5 – Matriz de misturas asfálticas estudadas.....	53
Tabela 6 – Resultados da metodologia Bailey	54
Tabela 7 – FAD e porosidade FAD de todas as misturas	55
Tabela 8 – Teor de ligante asfáltico das misturas	60
Tabela 9 – Resultados de Gmm para as misturas asfálticas	63
Tabela 10 – Variação de volume de vazios entre campo e projeto	64
Tabela 11 – Características dos corpos de prova do ensaio de Módulo Dinâmico ...	66
Tabela 12 – Matriz de amostras produzidas.....	79
Tabela 13 – Parâmetros das curvas de fadiga para amostras de laboratório	93
Tabela 14 – Classificação de textura superficial conforme altura de mancha de areia	95
Tabela 15 – Valores médios e desvio padrão de macrotextura para as amostras ..	102
Tabela 16 – Classificação conforme valor de resistência à derrapagem	104
Tabela 17 – Volume de vazios e porosidade das amostras	113

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos.....	17
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	20
2.1.1	Efeito da distribuição granulométrica.....	22
2.1.2	Efeito da volumetria	24
2.1.3	Efeito da compactação	28
2.2	TEXTURA SUPERFICIAL	30
2.2.1	Aderência entre pneu e pavimento	32
2.2.2	Efeito de características da mistura asfáltica na textura superficial.....	33
3	TRECHO EXPERIMENTAL.....	36
3.1	LOCALIZAÇÃO	36
3.2	MATERIAIS.....	38
3.2.1	Agregados	38
3.2.2	Ligante asfáltico.....	39
3.3	PROJETO DAS MISTURAS	50
3.4	EXECUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL E CONTROLE TECNOLÓGICO.....	56
4	ANÁLISES LABORATORIAIS	65
4.1	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	65
4.1.1	Propriedades viscoelásticas lineares.....	65
4.1.2	Deformação permanente	77
4.1.3	Fadiga.....	91
4.2	TEXTURA SUPERFICIAL DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	93
4.2.1	Macrotextura.....	94
4.2.2	Microtextura	103
5	MONITORAMENTO DE CAMPO DO TRECHO EXPERIMENTAL	110
5.1	CORPOS DE PROVA EXTRAÍDOS.....	110
5.1.1	Módulo de Resiliência.....	110

5.1.2	Tomografia	112
5.2	ENSAIOS DE CAMPO	119
5.2.1	Levantamento deflectométrico.....	119
5.2.2	Afundamento de trilha de roda	125
5.2.3	Área trincada	128
5.2.4	Irregularidade longitudinal	129
5.2.5	Macrotextura.....	130
5.2.6	Microtextura	137
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	140
6.1	Análises Laboratoriais	140
6.1.1	Propriedades viscoelásticas	140
6.1.2	Deformação permanente	140
6.1.3	Fadiga.....	141
6.1.4	Macrotextura.....	142
6.1.5	Microtextura	142
6.2	Monitoramento de campo.....	143
6.2.1	Módulo de resiliência	143
6.2.2	Tomografia	143
6.2.3	Levantamento deflectométrico.....	143
6.2.4	Afundamento de trilha de roda	143
6.2.5	Área trincada	144
6.2.6	Irregularidade longitudinal	144
6.2.7	Macrotextura e microtextura	144
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145
	APÊNDICE A – RESULTADOS DE LEVANTAMENTOS DEFLECTOMÉTRICOS	156

1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento e construção de uma estrutura de pavimento deve garantir trafegabilidade, segurança e conforto aos usuários da via. Porém, a exposição da estrutura ao efeito de condições climáticas e ação do tráfego, associada à falta ou inadequada manutenção, podem acelerar o aparecimento de defeitos da estrutura. Entre os defeitos mais comuns nos pavimentos asfálticos, destacam-se a fadiga por repetição de carga e a deformação permanente.

A fadiga se manifesta na forma de trincas no pavimento, que se propagam rapidamente, conforme a estrutura continua recebendo solicitações do tráfego pesado, e pode afetar camadas inferiores, à medida que a impermeabilização da camada superior fica comprometida, permitindo entrada de água. A evolução deste defeito, além de afetar camadas subjacentes, se manifesta em forma de “painéis”, constituindo um ponto que põe em risco os três parâmetros citados (trafegabilidade, segurança e conforto).

A deformação permanente se manifesta por afundamentos longitudinais nos pontos de trilha de roda da pista. Estes afundamentos, além de causarem irregularidade superficial, que compromete a trafegabilidade e o conforto, podem ser pontos de acúmulo de água em dias de chuva. Com a formação da película de água nos afundamentos, é propícia a ocorrência de aquaplanagem, apresentando risco à segurança do usuário.

Ambos os defeitos podem ser resolvidos com ações de restaurações na rodovia, e, se não houver comprometimento das camadas subjacentes, pode ser feita a fresagem da camada asfáltica existente e execução de novo revestimento. No processo de construir uma camada de revestimento asfáltico nova, o projeto e a execução do serviço têm papel importante para que os defeitos não afetem a estrutura precocemente.

A etapa de projeto deve selecionar materiais com bom comportamento e que, com dosagem adequada, propiciem longa durabilidade em campo. Esta seleção deve levar em conta características dos agregados (forma, textura superficial, angularidade, granulometria), do ligante asfáltico e da mistura de ambos (estrutura

interna e teor de ligante). Além disso, deve garantir que o método de compactação escolhido represente, na medida do possível, o campo. Já o processo de execução deve garantir que os parâmetros definidos no projeto da mistura sejam atendidos adequadamente.

Na execução, primeiramente ocorre a etapa de usinagem. Nessa etapa, características como teor de ligante e atendimento da faixa granulométrica podem ser comprometidas, uma vez que o controle de grandes quantidades de material é mais complexo, e, erros podem diminuir consideravelmente a durabilidade do revestimento. Após a usinagem, fatores como a distância da usina até a obra, esforços de compactação e temperatura da mistura na compactação, podem afetar parâmetros volumétricos da mistura. Além de ligada a compactação, a volumetria está diretamente relacionada ao teor de ligante e à granulometria, de modo que este parâmetro pode ser comprometido em qualquer etapa da execução, e pode, consequentemente, afetar o desempenho da camada de revestimento.

Além da ocorrência dos defeitos na superfície de pavimentos asfálticos, outro fator pode também comprometer a segurança dos usuários: a textura superficial. Esta característica da camada afeta a aderência entre o pneu e o pavimento, e é diretamente influenciada por propriedades da mistura asfáltica como distribuição granulométrica, volume de vazios e método de compactação.

Desse modo, a granulometria, a volumetria e as características superficiais de uma mistura asfáltica a ser usada como camada de rolamento deve ser estudada cuidadosamente antes da aplicação em campo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é avaliar a durabilidade e a textura superficial de misturas asfálticas aplicadas como restauração de camada de rolamento, por meio de monitoramento de trecho experimental e ensaios laboratoriais.

1.1.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, alguns objetivos específicos são propostos conforme listados a seguir.

- Avaliar o comportamento mecânico das misturas (rigidez, deformação permanente e fadiga) quanto à variação de granulometria e volumetria por meio de ensaios laboratoriais;
- Avaliar a textura superficial das misturas (macrotextura e microtextura) quanto à variação de granulometria e volumetria, e sua evolução em ciclos de passagem de simulador de tráfego, em laboratório;
- Avaliar em laboratório o efeito da diferença do método de compactação de placas na textura superficial das amostras e no comportamento quanto à deformação permanente;
- Avaliar o efeito da granulometria e da volumetria na estrutura interna das misturas asfálticas;
- Avaliar o desempenho estrutural e funcional das misturas (rigidez, deformação permanente e área trincada) quanto à variação de granulometria e volumetria com monitoramento de trecho experimental;
- Avaliar a evolução da textura superficial das misturas (macrotextura e microtextura) quanto à variação de granulometria e volumetria com monitoramento de trecho experimental.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 1 trata das motivações do estudo, objetivos, organização do texto e apresenta o fluxograma de organização da pesquisa.

O capítulo 2 discute uma revisão bibliográfica sobre o comportamento mecânico das misturas asfálticas usinadas a quente (rigidez, deformação permanente e fadiga), quanto aos efeitos da distribuição granulométrica, volumetria e compactação, e sobre a textura superficial de revestimentos asfálticos.

O capítulo 3 apresenta o trecho experimental, com dados de caracterização dos materiais utilizados, projeto das misturas e execução do trecho.

O capítulo 4 apresenta os métodos laboratoriais utilizados juntamente com os respectivos resultados quanto a caracterização mecânica e de textura superficial.

O capítulo 5 discute os resultados de ensaios de campo de acordo com o monitoramento periódico do trecho experimental por um período de um ano.

O capítulo 6 finaliza a dissertação, com apresentação das considerações finais, apresentando as principais contribuições deste estudo.

A Figura 1 apresenta o fluxograma de acordo com as etapas seguidas neste estudo.

Figura 1 – Fluxograma da dissertação

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

A concepção de uma estrutura de pavimento deve ser feita de modo a assegurar a trafegabilidade, a segurança e o conforto aos usuários, levando em conta condições climáticas e o tráfego a que o pavimento estará submetido. A ausência ou inadequada manutenção da estrutura pode fazer com que os defeitos se desenvolvam de maneira precoce. Entre os defeitos mais comuns nas rodovias brasileiras, se destacam a fadiga e a deformação permanente.

O termo fadiga está associado à deterioração sob carregamento repetido que leva ao fissuramento e, algumas vezes, ao colapso de componentes estruturais. Muitos materiais quando submetidos a tensões cíclicas, em níveis inferiores àqueles que causariam sua ruptura, acabam desenvolvendo internamente mudanças estruturais progressivas, perdendo suas características iniciais, o que culmina num processo de microfissuração que tem como consequência o rompimento do material (BALBO, 2007). Uma estrutura de pavimento pode atingir a ruptura devido a fatores relacionados ao clima, à execução e, especialmente, às passagens das cargas do tráfego (FRANCO, 2007). A propagação de fissuras pode ser visualmente observada na superfície de camadas asfálticas, e pode afetar camadas adjacentes da estrutura (BALBO, 2007).

A deformação permanente é apresentada como uma distorção na superfície do pavimento causada pela consolidação de uma ou mais camadas do pavimento. Isto é, o acúmulo de pequenas ou grandes deformações não recuperáveis decorrente da aplicação de carga proveniente do tráfego de veículos. Esta deformação pode ser atribuída ao revestimento ou às subcamadas, ou ainda à uma combinação de efeitos. As camadas não-asfálticas abaixo do revestimento podem apresentar deformações permanentes por densificação adicional pelo tráfego e por ruptura ao cisalhamento (YODER & WITCZAK, 1975).

Quando a deformação permanente é atribuída apenas à mistura asfáltica, pode ter causada por densificação e/ou movimento lateral (deformação por cisalhamento) desse material sob a ação do tráfego. Na densificação, há diminuição do volume e,

consequentemente, aumento da densidade. Na deformação por cisalhamento, observam-se mudanças de forma na camada asfáltica, sem que haja alteração volumétrica considerável (BROWN et al., 2001).

A fim de manter a qualidade da via, a pavimentação utiliza estratégias de reabilitação ou reconstrução de pavimentos existentes. A intervenção em uma rodovia de alto volume de tráfego deve estar associada a uma perspectiva de ciclo de vida, a fim de trazer uma melhor utilização dos recursos. Desta forma, a durabilidade da mistura utilizada na intervenção deve ser adequada (JONES et al., 2004).

A construção de uma camada de restauração ou reconstrução de mistura asfáltica divide-se nas etapas de projeto e de execução. Na etapa de projeto, busca-se selecionar agregados que formem um esqueleto pétreo adequado e um tipo de ligante asfáltico que combinado aos agregados, resulte em uma mistura com bom comportamento mecânico (BESSA, 2017). Além de possíveis erros de dosagem, misturas produzidas em grande quantidade em usina, diferentemente da etapa laboratorial, podem apresentar variações em parâmetros como teor de ligante e granulometria, devido à maior dificuldade de controle na etapa de usinagem (EPPS e HAND, 2000; MOURA, 2010; FACCIN, 2018). Ainda são necessárias novas metodologias de controle que possam reduzir as divergências obtidas entre laboratório e a mistura em campo (MONTROYA et al., 2018).

Caso as etapas de projeto de mistura e usinagem sejam bem executadas, a mistura ainda pode apresentar problemas devido a fatores como condições climáticas, pela temperatura do ar ou ocorrência de chuva; métodos de compactação, de acordo com o tipo de rolo compactador ou número de passadas; e condições do local da obra, pela distância em relação à usina, tráfego no trajeto, o que pode afetar a temperatura da mistura; e, assim, comprometer a eficiência da compactação. Porém, é válido ressaltar que caso existam erros anteriores, a compactação não é capaz de compensá-los (LINDEN e VAN DER HEIDE, 1987; MONTROYA et al., 2018), por exemplo, uma redução no teor de ligante asfáltico impacta na necessidade de maior energia de compactação da mistura asfáltica em comparação a uma mistura com alto teor. Os efeitos de uma compactação inadequada podem ser apresentados na redução de rigidez, menor vida de fadiga, envelhecimento acelerado, decréscimo da

durabilidade, ocorrência de afundamento em trilha de roda e suscetibilidade ao dano por umidade (USACE, 2000; NCAT, 2011; AWED et al., 2015).

2.1.1 Efeito da distribuição granulométrica

Ainda que o ligante asfáltico seja de grande importância, características relativas ao agregado exercem maior influência em relação à deformação permanente (KENNEDY et al., 1994; ONOFRE, 2012), especialmente em temperaturas altas (HUANG et al., 2009). A alteração de uma única propriedade do material pode afetar características fundamentais de mistura asfáltica (GOUVEIA, 2006), como o tipo, forma, angularidade e textura do agregado, conforme tema de muitos estudos (UGE e VAN DE LOO, 1974; SEEBALY, 1997; KHEDAYWI e TONS, 1998; STAKSTON, 2002; STIADY et al., 2002; GOUVEIA, 2006; BAHIA e FAHEEM, 2007; HADDOCK et al., 2008; HUANG et al., 2009; ONOFRE, 2012; PAZOS, 2015; FLETCHER et al., 2017).

Muitos autores dão destaque à distribuição granulométrica como uma das características de maior importância relacionadas ao agregado na deformação permanente em misturas asfálticas (HAND e EPPS, 2001; HAND et al., 2001; KANDHAL e MALLICK, 2001; STAKSTON, 2002; STIADY et al., 2002; BHASIN et al., 2006). Isto se deve ao atrito entre os grãos que a granulometria é capaz de garantir, uma vez que a distribuição de tensões em uma matriz de agregados adequadamente intertravada reduz a influência do tipo de ligante ou mástique da mistura (BUTTON et al., 2002; NASCIMENTO, 2008). Ainda, a variação de granulometria pode determinar a sensibilidade da mistura a variações de outros parâmetros como o teor de ligante, discutido anteriormente (MOURA, 2010).

Dada a importância da seleção adequada do esqueleto pétreo, existem algumas metodologias para auxiliar nesta etapa, de modo a analisar o empacotamento das partículas de agregado. As indicações para seleção de distribuição granulométrica pelo método de dosagem Superpave é mais eficiente em relação a metodologia Marshall, atingindo variação de até 50% na redução de ocorrência de deformação permanente (AL-HUMEIDAWI, 2016). O método para seleção de distribuição granulométrica Bailey, proposto por Vavrik et al. (2002), define a fração graúda como as partículas que criam os vazios dentro da estrutura, enquanto a fração fina é

definida como as partículas que preenchem estes vazios. A metodologia de Faixa de Agregado Dominante (FAD), proposta por Kim (2006), baseada no método Bailey, tem o objetivo de aumentar o intertravamento da matriz de agregado com base em propriedades volumétricas da mistura asfáltica, de modo a caracterizar a interação entre os diferentes tamanhos de partículas de agregado.

A metodologia FAD, por meio do parâmetro de porosidade FAD, tem sido bem correlacionada com resultados de *Flow Number*, relacionado a suscetibilidade à deformação permanente de misturas asfálticas quentes (BASTOS, 2016; FACCIN, 2018; FERREIRA et al., 2020). Por outro lado, a falta de correlação já foi mencionada em estudos entre FN e a metodologia FAD, para misturas mornas (FACCIN, 2018).

Uma granulometria densa pode apresentar bom comportamento quanto à deformação permanente (MOURA, 2010), especialmente se combinada ao uso de ligante asfáltico modificado, podendo demonstrar superioridade à mistura descontínua combinada com uso de asfalto borracha (COLERI et al., 2012). Deve-se atentar quanto à textura superficial deste tipo de mistura, uma vez que pode apresentar textura fechada (MOURA, 2010).

O estudo de variações de distribuição granulométrica dentro dos limites superior e inferior de granulometria densa também já foi discutido. A variação tanto para cima quanto para baixo da linha de máxima densidade pode resultar em misturas de melhor comportamento quanto a deformação permanente (GOLALIPOUR et al., 2012; NASCIMENTO et al., 2015).

A graduação descontínua, como é o caso do gap-graded, tem o objetivo de tornar o esqueleto mineral da mistura mais resistente à deformação permanente (BERNUCCI et al., 2010), e, se compactadas adequadamente, apresentarão maior contato entre partículas graúdas (NASCIMENTO, 2008). Quando composto por ligante asfáltico do tipo asfalto borracha, o gap-graded pode apresentar bom comportamento quanto à deformação permanente, tanto em campo, quanto em laboratório (KALOUSH et al., 2003; MOURA, 2010; CAMARGO, 2016)

No entanto, não há unanimidade na definição do comportamento de misturas descontínuas quanto à deformação permanente, especialmente para o gap-graded. Alguns estudos apontam menor resistência à deformação permanente em misturas descontínuas (BROWN e PELL, 1974; SOUSA et al., 1991; PALIT et al., 2004), explicada pelo elevado volume de vazios (HARVEY e PAPESCU, 2000) ou instabilidade causada pela falta de cuidados na hora da seleção da descontinuidade (BROSSEAUD et al., 1993).

A distribuição granulométrica também pode afetar o comportamento à fadiga das misturas asfálticas (HAND e EPPS, 2001). Alterando uma mistura aberta para densa, a vida de fadiga da mistura pode aumentar – se considerado ensaio a tensão controlada (TANGELLA et al., 1990).

Granulometrias mais miúdas, isto é, que tendem a elevar o teor de ligante asfáltico, podem aumentar a vida de fadiga do material (SOUSA et al., 1998; HAFEEZ et al., 2015), neste caso um erro de teor de ligante em usinagem para menos seria prejudicial ao comportamento quanto à fadiga. Mistura do tipo gap-graded, que é usualmente aliada ao uso de asfalto-borracha, implica em bom desempenho da mistura quanto à fadiga, em laboratório e em campo (PALIT et al., 2004; CAMARGO, 2016).

Erros na execução que favoreçam a segregação do material asfáltico, podem influenciar na vida de fadiga, reduzindo-a no caso de agregado graúdo segregado, e aumentando-a no caso do agregado miúdo. Deve-se levar em conta que a segregação no agregado miúdo ao passo que aumenta a vida de fadiga, pode se tornar mais suscetível à deformação permanente, devido a ausência de agregado graúdo necessário para formar o esqueleto pétreo adequado da mistura (KHEDAYWI e WHITE, 1996). Este ponto é importante especialmente em relação a misturas descontínuas, uma vez que não devem ser compactadas com rolo vibratório, devido ao risco de segregação do material (BERNUCCI et al., 2010).

2.1.2 Efeito da volumetria

O volume de vazios de uma mistura asfáltica pode estar ligado à distribuição granulométrica, ao teor de ligante asfáltico e à energia de compactação. Uma

distribuição granulométrica contínua tem os vazios deixados pelos agregados graúdos, preenchidos por agregados de tamanhos intermediário ou miúdo, resultando em baixo volume de vazios, enquanto a descontinuidade introduzida na granulometria caracteriza uma mistura asfáltica de volume de vazios mais alto em relação à contínua, apesar de ambas serem consideradas de granulometria densa. Deste modo, misturas asfálticas de granulometria descontínua, com maior volume de vazios, podem apresentar menor rigidez em relação a uma mistura continuamente graduada (TANGELLA et al., 1990; SOUSA et al., 1991).

Na teoria, a granulometria ideal resultaria em bom empacotamento dos grãos, ocasionando em maior densidade da mistura. Este arranjo elevaria a estabilidade devido ao contato partícula-partícula e reduzida porcentagem de Vazios do Agregado Mineral (VAM). No entanto, precisa-se de um espaço mínimo que permita a incorporação de quantidade adequada de ligante asfáltico, visando a durabilidade e compactação adequada; além de vazios com ar para evitar a exsudação, a desestabilização do sistema e ajudar na flexibilidade necessária à camada (COOPER et al., 1985; COOPER et al., 1988; NASCIMENTO, 2008).

Valores altos de VAM implicam em maior potencial de ocorrência de deformação permanente (SOUSA et al., 1991; STIADY et al., 2002). No entanto, misturas de VAM abaixo de 10% também devem ser evitadas (SOUSA et al., 1991), uma vez que ficam mais sensíveis a pequenas mudanças do teor de ligante, o que prejudica o processo construtivo (NASCIMENTO, 2008). Indica-se valor de VAM superior a 15% após a compactação pela ação do tráfego (COOPER et al., 1985; COOPER et al., 1988); para o caso de tamanho máximo nominal de 12,5mm, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) especifica que, o valor seja superior a 16%.

A distribuição granulométrica, juntamente com outros parâmetros do agregado, influencia na sensibilidade da mistura quanto ao teor de ligante asfáltico (EPPS e HAND, 2000). No entanto, para todas as misturas, existe a relação inversa do teor de ligante em relação ao volume de vazios, de modo que quanto maior o teor de ligante asfáltico, menor o volume de vazios.

O teor elevado de ligante asfáltico da mistura, faz com que o filme que envolve os agregados tome espessura de modo a lubrificar os grãos, reduzindo o intertravamento entre eles, aumentando a suscetibilidade à deformação permanente (MAHBOUB e LITTLE, 1988; KHEDAYWI e TONS, 1998; MOURA, 2010). O aumento de teor de ligante, impactando em volume de vazios inferior a 2% ou 3%, elevam o potencial de ocorrência de deformação permanente (COOPER et al., 1985; MONISMITH et al., 1985; SOUSA et al., 1991). Para o caso brasileiro, um baixo volume de vazios (inferior a 3%) pode ser ainda mais prejudicial, devido às elevadas temperaturas a que o pavimento está sujeito (MOURA, 2010).

Um aumento de 0,2% no teor pode levar a redução de até 30% no valor de *Flow Number* para misturas do tipo concreto asfáltico (BONAQUIST, 2012). Para o caso de um concreto asfáltico, alterações de 0,3% de ligante asfáltico convencional podem resultar em afundamentos em trilha de roda na ordem de 30%, medidos por simulador de tráfego LCPC após 30.000 ciclos (BERNUCCI et al., 2002). Quanto à deformação permanente, os parâmetros relativos ao ligante asfáltico exercem maior influência quando em temperaturas abaixo do limite superior do grau de desempenho do ligante, e, quanto mais próximas do limite superior, maior a influência da matriz de agregado (HUANG et al., 2009).

Quanto a fadiga, o alto teor de ligante asfáltico, portanto, o baixo volume de vazios, pode resultar no aumento da vida de fadiga – em ensaio com tensão controlada; ou redução – em ensaio de deformação controlada; em misturas asfálticas densas (TANGELLA et al., 1990). O volume de vazios é muito importante quanto ao comportamento à fadiga do material, e deve ser o menor possível, no entanto, até um limite de 3%, deve-se atentar ao mesmo tempo à suscetibilidade à deformação permanente ocasionada pelo alto teor de ligante asfáltico (TANGELLA et al., 1990).

Por outro lado, misturas com teor de ligante asfáltico mais baixos podem apresentar maior resistência à deformação permanente (LINDEN e VAN DER HEIDE, 1987). No entanto, para misturas descontínuas, como o gap-graded, o volume de vazios acima do ideal pode propiciar o desenvolvimento da deformação permanente (FRITZEN, 2005). Em estudo com variadas granulometrias, teores de fíler e teores de ligante, Epps e Hand (2000) reportaram que as misturas asfálticas apresentaram maior sensibilidade à redução de teor de ligante asfáltico, em relação ao aumento do teor.

Os mesmos autores ainda relataram que a redução do teor impactou de diferentes formas cada mistura, enquanto o aumento do teor teve o mesmo efeito em todas as granulometrias.

Em laboratório, menores volumes de vazios e maiores teores de ligante asfáltico implicam em aumento da vida de fadiga. Em simulações usando o ELSYM5, com estruturas e carregamentos hipotéticos, a redução no volume de vazios melhora a vida de fadiga, assim como o aumento no teor de ligante asfáltico. Destaca-se que altos volumes de vazios podem reduzir a vida de fadiga de um pavimento drasticamente (HARVEY e TSAI, 1996). Uma mudança de 5% no volume de vazios exerce maior influência na rigidez da mistura asfáltica do que uma mudança de 1% no teor de ligante asfáltico desta mistura, já para avaliação da vida de fadiga, com teste em deformação controlada, a mudança de 1% no teor de ligante asfáltico mostrou maior influência no comportamento da mistura, em relação a mudança de 5% de volume de vazios (ZEIADA et al., 2013).

Ainda, o efeito da variação da volumetria em misturas asfálticas é dependente do tipo de ligante asfáltico utilizado (SANTOS, 2005). A sensibilidade na variação de teor de ligante pode ser mitigada pela utilização de ligante asfáltico modificado por polímero, que também ajuda na redução do efeito da deformação permanente (MOURA, 2010; LEANDRO et al., 2017).

O uso de modificadores pode aumentar a rigidez da mistura asfáltica em temperaturas críticas, o que melhora a resistência à deformação permanente (SOUSA et al., 1991; CEZARO JUNIOR, 2008; ONOFRE, 2012; NASCIMENTO et al., 2015), ao mesmo tempo que confere melhor comportamento mecânico à fadiga (CEZARO JUNIOR, 2008; ONOFRE, 2012; LEANDRO et al., 2017).

O ligante asfáltico modificado por polímero destaca-se como um bom melhorador de características da mistura asfáltica quando à deformação permanente (BARROS et al., 2015), também responsável por maior rigidez de misturas, em relação a convencionais (FACCIN, 2018). Leandro et al. (2017) em estudo com variação de ligantes asfálticos sugere que ligantes asfálticos modificados por polímero SBS conferem à mistura características de menor suscetibilidade à temperatura, o que indica bom comportamento em altas temperaturas e com tráfego lento.

Por outro lado, a utilização de ligantes modificados pode afetar negativamente a permeabilidade da mistura, assim como a cal hidratada (LU e HARVEY, 2011). A permeabilidade de misturas asfálticas é diretamente afetada pela volumetria, seja pelo volume, estrutura ou interconectividade destes vazios, o que afeta misturas de granulometria aberta, com finalidade drenante (MERCADO, 2007).

Além da volumetria e granulometria, previamente discutidos, a compactação da mistura exerce influência significativa no processo. A aplicação de energia de compactação inadequada pode afetar propriedades volumétricas da mistura asfáltica.

2.1.3 Efeito da compactação

A compactação exerce grande importância para a condição final da mistura asfáltica num processo de construção. No entanto, se as etapas anteriores de dosagem e usinagem não forem eficientes, não atendendo às especificações volumétricas adequadas, em campo, a compactação não conseguirá compensar este erro (LINDEN e VAN DER HEIDE, 1987; MONTOYA et al., 2018). Uma mistura projetada com 4% de volume de vazios, porém compactada em campo em 92-93% da densidade máxima teórica da mistura pode apresentar comportamento mecânico pior em relação a uma mistura projetada com 5% de volume de vazios, compactada em campo com 95% da densidade (HEKMAFTAR, 2016). Um aumento de 2% na densidade da mistura asfáltica em campo pode aumentar a vida útil de uma estrutura de pavimento em aproximadamente 20% (TRAN et al., 2016).

Cada modo de compactação influencia diferentemente o comportamento mecânico da mistura, o que está diretamente relacionado ao volume de vazios final da mistura, e pode resultar em suscetibilidade à deformação permanente (GIBSON et al., 2010). Os efeitos de uma má compactação podem ser apresentados na redução de rigidez, menor vida de fadiga, envelhecimento acelerado, decréscimo da durabilidade, ocorrência de afundamento em trilha de roda e suscetibilidade à umidade (USACE, 2000; NCAT, 2011; AWED et al., 2015).

Bernucci et al. (2010) destacam o fato de misturas asfálticas de distribuição granulométrica descontínua, para manterem o esqueleto pétreo adequado, sem

segregação, não devem ser compactadas por rolo vibratório, apenas rolo tandem liso estático. Harvey e Papescu (2000) destacam que misturas descontínuas, como gap-graded, compactadas inadequadamente, isto é, com maior volume de vazios em campo, podem apresentar suscetibilidade a deformação permanente por fluência. Os mesmos autores apontam que é necessário ter cuidado também com a temperatura de compactação deste tipo de mistura, pois perdem temperatura rapidamente.

Mourão (2003) em estudo sobre mistura do tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA), de granulometria descontínua, alerta para a necessidade de cuidados detalhados durante a compactação deste tipo de mistura. O uso de rolo compactador vibratório não é recomendado para espessura inferior a 2cm, devido a possibilidade de desagregação ou esmagamento dos agregados da mistura asfáltica, ou, exsudação do ligante asfáltico.

Apesar da especificidade das misturas asfálticas de granulometria descontínua quanto ao processo de vibração em campo, considerando a possibilidade de ocorrência de segregação, é válido ressaltar que este tipo de falha pode acontecer devido a erros na usinagem, transporte, lançamento ou compactação da mistura asfáltica (ZHANG et al., 2017).

Em laboratório, os métodos de compactação visam simular de forma adequada a compactação de campo, de modo a garantir a eficiência do dimensionamento da mistura (PETERSON et al., 2003; RADZI et al., 2019). Porém, de mesma forma que em campo, a compactação de misturas asfálticas em laboratório também é afetada pelo método de compactação, o que impacta nos parâmetros volumétricos e na estrutura interna das misturas asfálticas, e, conseqüentemente, em suas propriedades mecânicas (BUTTON et al., 1992; NASCIMENTO, 2008; BAHIA et al., 2013). Masad (2008) comparou o compactador giratório *Superpave* (SGC) e *Linear Kneading Compactor* (LKC); Hunter et al. (2004) compararam compactações vibratória, giratória e em placas; Peterson et al. (2003) sugeriram ajustes no método SGC, mas mesmo com a aplicação destes, reportou que as amostras ainda apresentavam diferenças severas em relação ao campo. Radzi et al., (2019) em estudo de revisão de literatura descreveram vários métodos de compactação, e enfatizaram que o método de compactação com rolo em laboratório é o que mais se

assemelha à compactação em campo, mas sugere que novas abordagens sejam discutidas para este método de compactação.

2.2 TEXTURA SUPERFICIAL

As condições superficiais do pavimento, caracterizada pela textura e pelo atrito, possui relação consistente com a segurança da via, uma vez que a aderência entre pneu e pavimento proporcionada pelos parâmetros citados garante o controle do veículo na pista (HALL et al., 2009; Carvalho, 2019). Entretanto, a segurança em uma rodovia está relacionada a diversos fatores como a condição climática, devido à ocorrência de chuva, temperatura, neve; as propriedades dos pneus dos veículos, como design, condição do pneu, pressão de inflação; os parâmetros de operação dos veículos como a velocidade da via; e as características da camada de revestimento como tamanho, forma e graduação dos agregados (AASHTO, 2007).

As características de textura superficial da camada de revestimento podem ser alteradas pelo tipo de agregado, levando em conta a rugosidade e a angularidade do agregado; pela distribuição granulométrica, devido ao intertravamento gerado entre os diferentes tamanhos de agregado; e até pelos defeitos da rodovia, que geram irregularidades na superfície alterando a qualidade ao rolamento.

A textura de um pavimento é descrita como a variação de alturas de uma superfície de pavimento, em relação a uma superfície plana (HALL et al., 2009). Uma superfície de pavimento pode ser analisada como uma série contínua de picos e vales, que podem ser bem definidos, ou aleatórios. Para caracterizar a textura superficial, faixas de comprimento de onda e amplitude são definidos.

Qualquer tipo de superfície pode ser descrito como a soma de um número de variações senoidais em amplitude e comprimento de onda. Esse processo de reduzir uma superfície complexa em sua componente de onda é conhecida como Análise de Fourier, onde cada forma de onda é associada com uma amplitude de textura e comprimento de onda, ambas em milímetros. Estes comprimentos de onda de texturas podem influenciar as características de superfícies, relacionadas a ruído,

rolamento do pneu e resistência à derrapagem (ROBERTS et al., 1996; SANDBERG, 1997; FEHRL, 2006), conforme a Figura 2.

Figura 2 – Características da textura superficial com respectivas faixas de comprimento e amplitude de onda

Fonte: Adaptado de Sandberg (1997)

Cada uma das características da textura superficial exerce influência na segurança da via. A microtextura é o que faz a superfície parecer mais ou menos áspera, mas tem dimensões muito pequenas para ser vista a olho nu. É obtida pelas propriedades de superfície individuais dos agregados (angularidade e rugosidade) ou outras partículas da superfície que possam ter contato direto com os pneus dos veículos. A macrotextura apresenta comprimentos de onda na mesma grandeza que as ranhuras do pneu na interface pneu/pavimento. As camadas de revestimento geralmente são dimensionadas com determinada macrotextura de modo a garantir drenagem adequada na interface pneu/pavimento. A macrotextura é obtida pela proporção adequada entre agregado e mástique, ou por determinadas técnicas de finalização da superfície. A megatextura tem comprimentos de onda na mesma grandeza que a interface pneu/pavimento. É comumente referida como "buracos" ou "ondulação", normalmente, é uma característica não desejada e resultado de defeitos na superfície. Rugosidade de superfície com comprimento de onda maior que megatextura é denominada irregularidade.

2.2.1 Aderência entre pneu e pavimento

O atrito entre pneu e pavimento é o resultado da interação entre os dois corpos, não sendo, portanto, uma propriedade exclusiva do pneu, ou da superfície do pavimento. Essa interação entre as superfícies permite que os usuários da via dirijam com segurança, permanecendo na pista sem necessidade de manobras arriscadas (FLINTSH et al., 2012).

O atrito pode ser dividido em dois principais mecanismos de interação pneu/pavimento. Primeiramente, a adesão, que está relacionada a ligação entre moléculas do pneu e moléculas da superfície do pavimento e é sensível com a presença de sujeira e água, que separam o pneu do pavimento, diretamente relacionada a microtextura. A histerese é resultado de uma perda de energia devido à deformação do pneu do veículo, descrita comumente como o envelopamento do pneu na textura. Quando o pneu é pressionado contra a superfície do pavimento, a distribuição de tensões faz com que a deformação gere energia a ser estocada na borracha. Quando o pneu relaxa, parte da energia estocada é recuperada, enquanto outra parte é perdida em forma de calor, que é irreversível. Isto é, a histerese está relacionada a um tempo de “atraso” na recuperação da deformação que o pneu sofre pelo contato com a superfície do pavimento, uma vez que o pneu possui propriedades viscoelásticas, e está ligada à macrotextura da superfície (SANDBERG, 1997; HALL et al., 2009; VIEIRA, 2014).

Em dias de chuva, pode acontecer quebra na adesão entre pneu/pavimento, causada pela presença de água. Com pequenas quantidades de água no pavimento, o pneu, apenas com a pressão que exerce, consegue eliminar a água do contato, porém, à medida que se eleva a quantidade de água e a velocidade do veículo, a água começa a separar o contato entre pneu/pavimento em áreas cada vez maiores. No pior caso, acontece a aquaplanagem, quando já não existe o contato entre pneu/pavimento.

As características de textura do pavimento que predominantemente afetam a aderência entre pneu-pavimento são a microtextura e a macrotextura (HENRY, 2000). A microtextura exerce uma importância imensa quanto ao contato do pneu/pavimento, desde as velocidades mais baixas. Quanto maior a velocidade da

via, maior a importância da macrotextura, uma vez que, em velocidades altas não há tempo suficiente para a água sair da interface pneu/pavimento, de modo que uma macrotextura profunda é necessária para garantir o contato entre as duas superfícies (SANDBERG, 1997; WAMBOLD et al., 1995; FLINTSH et al., 2012), conforme Figura 3. Em velocidades acima de 90km/h em pavimentos com superfície molhada, a macrotextura se torna responsável por uma grande porção do atrito (FLINTSH et al., 2012).

Figura 3 – Faixa de influência da microtextura e macrotextura

Fonte: Adaptado de Sandberg (1997)

A classificação da macrotextura do pavimento isoladamente não é suficiente para garantia da segurança da via. A lâmina d'água provável na pista, calculada de acordo com os dados pluviométricos da região também tem importância, como método de previsão/prevenção de hidroplanagem (FERREIRA, 2002). Além disso, as características do atrito entre pneu e pavimento são levadas em conta no cálculo de distância mínima de parada, essencial para garantir que situações de perigo não se concretizem em acidentes.

2.2.2 Efeito de características da mistura asfáltica na textura superficial

As características da mistura asfáltica podem ser melhor definidas de modo a assegurar adequada aderência entre pneu pavimento. No caso da microtextura, a escolha do tipo de agregado, levando em conta características mineralógicas é importante. Já na macrotextura, a definição da distribuição granulométrica da mistura ganha mais importância. Hall et al. (2009) destacam que os agregados graúdos influenciam mais nas propriedades de atrito.

Distribuição granulométrica do tipo aberta, como Camada Porosa de Atrito (CPA), exibem boas características de textura superficial (KANDHAL e MALLICK, 1998; HUBER, 2000), assim como misturas do tipo gap-graded, com bons resultados de macrotextura e atrito, o que impacta na redução de acidentes, especialmente em situação de pista molhada (CARVALHO, 2019). A durabilidade destas misturas pode ser aprimorada com o uso de ligante asfáltico modificado por polímero (KANDHALL e MALLICK, 1998). O ligante asfáltico pode influenciar até mesmo em características de textura da mistura asfáltica, como é o caso do asfalto-borracha, que pode contribuir no aumento da microtextura quando comparado ao ligante convencional (PEREIRA et al., 2008).

Deve-se atentar quanto à evolução das propriedades de aderência com o tempo, devido ao desgaste causado pelo efeito de condições climáticas e do tráfego. Neste caso, conhecimento de parâmetros em relação a suscetibilidade ao polimento, rugosidade e mineralogia dos agregados é de suma importância (HALL et al., 2009). Com o tempo, misturas porosas podem acumular sujeira em seus vazios, ocasionando no fechamento da textura (HUBER, 2000). Carvalho (2019) destaca que este fechamento também pode ocorrer devido a anomalias na superfície causadas por deformação permanente na mistura, o que afeta diretamente na segurança da via.

A volumetria da mistura asfáltica também pode influenciar a textura superficial, de modo que, quanto maior o volume de vazios, maior os resultados de textura superficial, segundo estudo de Vaiana et al. (2013) considerando misturas densa, descontínua e aberta. A influência da volumetria é ainda maior em pavimentos porosos, de forma que, quanto maior o volume de vazios da mistura, maior a capacidade de drenagem do revestimento, e, portanto, maior atrito entre pneu e pavimento (HALL et al., 2009).

Ainda, a textura superficial pode ser afetada pela compactação da mistura asfáltica. Geralmente, medições de valores de macrotextura em laboratório tendem a ser mais altos do que os medidos em campo (PEREIRA et al., 2012; CARVALHO, 2019). Alguns estudos focam no efeito da compactação na textura superficial, como Georgiou e Loizos (2014) que reportaram uma boa correlação entre *International Friction Index* (IFI), calculado por ensaios de pêndulo britânico e mancha de areia,

comparando compactação com rolo em laboratório e compactação no campo, em misturas asfálticas densas. Carvalho (2019) encontrou diferentes características de textura superficial com medições por IFI, comparando compactação de laboratório com rolo e vibração, e compactação de campo, para misturas asfálticas do tipo gap-graded. Kassem et al. (2016) identificaram textura superficial com menores resultados de resistência à derrapagem em misturas compactadas com rolo vibratório.

3 TRECHO EXPERIMENTAL

3.1 LOCALIZAÇÃO

A escolha da localização do trecho experimental se deu pela necessidade de intervenção na localidade pelas más condições da via, com auxílio de levantamento deflectométrico por *Falling Weight Deflectometer* (FWD) para garantia de homogeneidade por toda a extensão do trecho experimental. O trecho experimental deste estudo está localizado na cidade de Cajati, estado de São Paulo, com início em longitude 24°50'12,1" Sul e latitude 48°13'20,9" Oeste, no km511 sentido sul da BR116 – Rodovia Régis Bittencourt, na faixa 3 da rodovia. A região de localização é de terreno montanhoso, e o tráfego é pesado, uma vez que a rodovia constitui um importante corredor de carga, ligando as cidades de Curitiba e São Paulo. O N (número acumulado de repetições do eixo padrão), calculado de acordo com as equações de equivalência de carga da USACE (*United States Army Corps of Engineers*) para um ano de vida útil do trecho experimental foi de $4,65 \times 10^7$.

A execução foi de responsabilidade da empresa Neovia Engenharia, com usina localizada em Campina Grande do Sul, estado do Paraná, com distância aproximada de 125km do trecho (Figura 4). O trecho tem extensão total de 1,08km, com largura de pista de 3,6m, dividido em oito segmentos que serão descritos a seguir (Figura 4Figura 5).

Figura 4 – Localização do trecho experimental e da Usina em relação a Curitiba

Fonte: Autora (2020)

Figura 5 – Localização dos segmentos do trecho experimental

Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2020)

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Agregados

Os agregados utilizados nesta pesquisa são oriundos da pedreira Basalto 8, localizada em Quatro Barras, estado do Paraná, distante cerca de 20km da usina e cerca de 30km de Curitiba, capital do estado. O agregado possui origem mineralógica granítica, e foram realizados ensaios de abrasão Los Angeles, densidade, absorção, granulometria, equivalente de areia, conforme dados apresentados na Tabela 1. Em adição, dados de massa específica e a granulometria dos agregados são apresentados (Tabela 2 e Figura 6).

Tabela 1 – Caracterização dos agregados

Ensaio	Resultado	Limite (Norma)
% Partículas com relação > (1:3)	8	Máximo 20 (ASTM D 4791-10, 2019)
% Partículas com relação > (1:5)	1	Máximo 5 (ASTM D 4791)
Abrasão Los Angeles (%)	16	Máximo 45 (DNER-ME 035/98)
Equivalente de Areia (%)	68	Mínimo 60 (DNER-ME 054/97)

Fonte: Autora (2020)

Tabela 2 – Massa específica dos agregados e fíler

Material	Massa específica real (g/cm ³)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Absorção de água (%)
Brita 3/4	2,699	2,661	0,5
Pedrisco	2,693	2,634	0,8
Pó de pedra	2,692	2,649	0,6
Cal CH "I"	2,430	-	-

Normas utilizadas: AASHTO T 19M/T 19 (2014); ASTM C 128 (2015).

Fonte: Autora (2020)

Figura 6 – Granulometria dos agregados e filer

Fonte: Autora (2020)

3.2.2 Ligante asfáltico

Neste estudo, optou-se por não adicionar mais uma variável referente ao tipo de ligante asfáltico, de modo que em todas as misturas avaliadas na pesquisa, foi utilizado o Asfalto Modificado por Polímero (AMP) de classificação, segundo a Agência Nacional do Petróleo (ANP), como 60/85. Como visto em literatura, ligantes asfálticos modificados são capazes de aprimorar o desempenho de misturas asfálticas, aumentando a resistência à fadiga e à deformação permanente (SOUSA et al., 1991; CEZARO JUNIOR, 2008; ONOFRE, 2012; COLERI et al., 2012; NASCIMENTO et al., 2015; LEANDRO, 2016; FACCIN, 2018). Foram realizados ensaios para caracterização do ligante asfáltico conforme dados apresentados a seguir (Tabela 3).

Tabela 3 – Ensaios convencionais de caracterização do ligante asfáltico

Ensaio	Resultado	Limite (Norma)
Penetração (10 ⁻¹ mm)	47,0	40 - 70 (NBR 6576/2007)
Ponto de Amolecimento (°C)	64,5	Mínimo 60 (NBR 6560/2016)
	135°C	Máximo 3000 (NBR 15184/2005)
Viscosidade Brookfield (cP)	150°C	Máximo 2000 (NBR 15184/2005)
	177°C	Máximo 1000 (NBR 15184/2005)
Ponto de Fulgor (°C)	>240	Mínimo 235 (NBR 11341/2014)
Densidade relativa (g/cm ³)	1,0	(NBR 6296/2013)
Recuperação elástica (%)	87,0	Mínimo 85 (NBR 15086/2006)

Fonte: Autora (2020)

Ainda, foram realizados ensaios com reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR, do inglês *Dynamic Shear Rheometer*) para obtenção das propriedades viscoelásticas lineares e construção da curva mestra em material envelhecido e não envelhecido, previsão do comportamento quanto à deformação permanente e à fadiga.

A preparação das amostras seguiu a norma ASTM D 7175 (2015). Para temperaturas de até 40°C, amostras de 25mm foram moldadas, com ajuste de *gap* (altura entre as placas do equipamento) de 1mm. Já para temperaturas abaixo de 40°C (intermediárias e baixas), amostras de 8mm foram moldadas, com ajuste de *gap* de 2mm. O processo de preparação das amostras encontra-se representado na Figura 7.

Figura 7 – Processo de fabricação das amostras (a) moldagem da amostra (b) colocação da amostra no equipamento (c) ajuste do gap

Fonte: Autora (2020)

Foram consideradas três condições do material: não-envelhecido, envelhecido em curto prazo e envelhecido em longo prazo. Para o caso de curto prazo, o envelhecimento foi realizado pelo equipamento *Rolling Thin Film Oven* (RTFO) e seguiu a norma ASTM D 2872 (2019), visando simular o efeito durante o processo de usinagem e transporte da mistura asfáltica. O ensaio realizado no RTFO consiste na simulação de efeitos do calor e do ar em uma amostra de ligante asfáltico, com duração de 85 minutos e temperatura aplicada de 163°C. Durante o ensaio, acontece uma injeção de ar na amostra em taxa de 4l/min. Já para o longo prazo, o envelhecimento foi realizado no equipamento *Pressurized Aging Vessel* (PAV) e seguiu a norma ASTM D 6521 (2019), visando simular o efeito ao longo da vida de serviço do pavimento. O ensaio no PAV consiste na aplicação de pressão de 2,1MPa durante 20 horas e em temperatura de 100°C na amostra de ligante asfáltico.

O ensaio para obtenção da zona de comportamento viscoelástico linear (LVE) seguiu a norma ASTM D 7175 (2015) e foi considerada a varredura de 0,1% até 20% (no caso de amostras não envelhecida e envelhecida após RTFOT) e a 5% (no caso de amostras envelhecidas após RTFOT e PAV) de amplitude de deformação em frequência de carregamento de 10rad/s. A verificação é feita de acordo com o valor de módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) com o incremento da deformação. Segundo a metodologia Superpave, o material está dentro de sua zona viscoelástica linear até a amplitude de deformação na qual há redução de no máximo 10% no valor de $|G^*|$. Para esta verificação, adotou-se a temperatura de 82°C para o caso de

amostras não envelhecidas e envelhecidas em curto prazo, que corresponde à temperatura na qual o potencial à deformação permanente do material é testado. Já para amostras envelhecidas em longo prazo, as temperaturas consideradas foram de 16°C e 37°C, correspondentes à faixa de temperatura intermediária, onde verifica-se o potencial à fadiga do material. Os resultados de módulo de cisalhamento dinâmico em função do aumento de deformação para as três condições de ligante asfáltico são apresentados na Figura 8.

Figura 8 - Determinação da zona viscoelástica linear do ligante FLEXPAVE 60/85 (a) amostra não-envelhecida (b) amostra envelhecida após o RTFOT (c) amostra envelhecida após RTFOT+PAV a 16°C (d) amostra envelhecida após RTFOT+PAV a 37°C

Fonte: Autora (2020)

Após, foi determinado o parâmetro reológico Superpave para previsão de deformação permanente ($|G^*|/\sin\delta$), em temperaturas altas. A obtenção deste parâmetro é feita por meio de varredura de temperatura, com frequência (10rad/s) e

amplitude de deformação (12% para as amostras sem envelhecimento, 10% para amostras envelhecidas após RTFOT e 1% para amostras envelhecidas após PAV) fixa. É desejado um valor elevado neste parâmetro, isto é, com alta rigidez ($|G^*|$) e baixo valor de ângulo de fase (δ) e o valor mínimo indicado é 1,0kPa. É necessário garantir que o material esteja dentro de sua zona viscoelástica linear para o nível de deformação aplicado no ensaio. A Figura 9 mostra os resultados para o caso do ligante asfáltico não envelhecido.

Figura 9 – Parâmetro reológico $|G^*|/\sin\delta$ em diferentes temperaturas para o ligante não-envelhecido

Fonte: Autora (2020)

Os resultados indicam que este ligante asfáltico teria comportamento adequado quanto à deformação permanente em temperaturas de até 76°C. Locais que apresentem temperaturas mais altas durante o ano não seriam apropriados para utilização deste material para composição de misturas asfálticas em camada de revestimento. Este mesmo parâmetro é obtido para amostras envelhecidas em curto prazo (após ensaio de RTFO) e, neste caso, o valor mínimo indicado é de 2,2kPa. A Figura 10 mostra os resultados em diferentes temperaturas para esta condição do material.

Figura 10 – Parâmetro reológico $|G^*|/\text{sen}\delta$ em diferentes temperaturas para o ligante envelhecido em curto prazo

Fonte: Autora (2020)

Para a condição de envelhecimento das amostras, verifica-se que o valor mínimo foi atingido até a temperatura de 70°C, de modo que temperaturas superiores não seriam adequadas para classificação do material analisado.

Em temperaturas intermediárias, pode-se obter o parâmetro Superpave para previsão de resistência à fadiga ($|G^*| \times \text{sen}\delta$). A obtenção é feita a partir de varredura de temperaturas, em frequência de 10rad/s e amplitude de deformação de 1%. É desejado que este valor seja baixo, uma vez que baixos valores de rigidez e ângulo de fase indicam um ligante asfáltico mais flexível e elástico. A normativa AASHTO M 332 (2014) indica o valor máximo de 5.000kPa para tráfego padrão e 6.000kPa para tráfego pesado/muito pesado/extremamente pesado. A Figura 11 mostra os resultados deste parâmetro.

Figura 11 – Parâmetro reológico $|G^*| \times \sin \delta$ em diferentes temperaturas para o CAP envelhecido em longo prazo

Fonte: Autora (2020)

Os resultados indicam que este ligante asfáltico teria comportamento adequado quanto à fadiga para temperaturas acima de 24°C no caso de tráfego pesado/muito pesado/extremamente pesado e acima de 25°C para tráfego padrão.

Também foram obtidas as curvas mestras do módulo de cisalhamento dinâmico e ângulo de fase do ligante asfáltico. A obtenção foi feita por meio de varredura de frequências (0,1 a 10Hz) e de temperaturas (0 a 80°C), com amplitude de deformação de 0,1%. Neste ensaio também é importante garantir que o material esteja em dentro da zona viscoelástica linear. A Figura 12 mostra os resultados de curvas mestras para todas as condições de amostras.

Figura 12 – Curvas mestras do CAP (a) módulo de cisalhamento dinâmico e (b) ângulo de fase

Fonte: Autora (2020)

Devido às críticas ao parâmetro Superpave para deformação permanente por apresentar baixa correlação com resultados de misturas asfálticas, foi conduzido o ensaio de *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR). Este ensaio tem o objetivo de avaliar a compliância não recuperável (J_{nr}), o percentual de recuperação e a

dependência dos ligantes asfálticos para diferentes níveis de tensão. O parâmetro J_{nr} tem resultado em boa correlação com misturas e com campo quanto à deformação permanente.

O ensaio foi realizado seguindo a norma ASTM D 7405 (2015), com tempo de fluência de 1 segundo e tempo de recuperação de 9 segundos, sob carregamentos de 100Pa e 3200Pa, em amostras após envelhecimento em curto prazo. A Figura 13 mostra os resultados obtidos, representados pela média entre duas amostras para cada temperatura.

Figura 13 – Resultados do ensaio de MSCR para o ligante asfáltico

Fonte: Autora (2020)

Os valores de J_{nr} e $J_{nr\,diff}$ mostram que a resistência do ligante asfáltico reduz à medida que se aumenta a temperatura. As temperaturas altas tornam o material menos rígido e mais sensível à variação de tensão aplicada. Estes resultados são considerados para a classificação do ligante asfáltico quanto ao seu grau de desempenho (PG), que é baseado em temperaturas máxima e mínima as quais este material poderia ser submetido em campo, além de levar em conta o nível de tráfego da rodovia em que o material será aplicado. Com os resultados de MSCR e de $|G^*|/\sin\delta$, o ligante asfáltico desta pesquisa foi classificado como PG 76H-XX ou PG

70V-XX ou PG 64E-XX, onde H, V e E significam tráfego pesado, muito pesado e extremamente pesado, respectivamente, de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação do tráfego de acordo com o Superpave

Nível de tráfego	Número N acumulado (AASHTO)	Valor máximo de Jnr a 3,2kPa (kPa ⁻¹)	Valor máximo de Jnr _{diff} (%)
<i>Standard</i> (S) - padrão	< 10×10 ⁶ e > 70km/h	4,5	75,0
<i>Heavy</i> (H) - pesado	10×10 ⁶ –30×10 ⁶ ou 20–70km/h	2,0	75,0
<i>Very heavy</i> (V) - muito pesado	> 30×10 ⁶ ou < 20km/h	1,0	75,0
<i>Extreme</i> (E) - extremo	> 30×10 ⁶ e < 20km/h	0,5	75,0

Fonte: AASHTO (2014)

O ligante asfáltico ainda foi caracterizado em relação à sua resistência ao dano por fadiga, por meio do ensaio *Linear Amplitude Sweep* (LAS). O ensaio consiste na aplicação de varredura de deformações de 0.1 a 30%, em frequência de 10Hz, durante 310 segundos. O ensaio foi realizado em amostras envelhecidas a longo prazo e em temperaturas intermediárias (consideradas 20°C, 25°C e 30°C, neste trabalho), uma vez que este defeito é característico destas condições. A ruptura do material é considerada no ponto de maior tensão de cisalhamento durante o ensaio e os parâmetros da curva de fadiga são obtidos por meio do modelo *simplified viscoelastic continuum damage* (SVECD). Os resultados são mostrados na Figura 14.

Figura 14 – Resultados do ensaio de LAS em diferentes temperaturas (a) evolução do ensaio e (b) curva de fadiga

Fonte: Autora (2020)

O comportamento das curvas de tensão por deformação indica que, na menor temperatura, momento de maior rigidez do ligante, há maior resistência à aplicação de tensões, porém, também há maior fragilidade do material, uma vez que o pico de tensão cisalhante ocorre em deformação mais baixa em relação às demais temperaturas testadas. O melhor comportamento do material quanto à fadiga foi apresentado na temperatura de 30°C, na qual o ligante se encontra menos rígido. A tendência encontrada neste ensaio é típica para ensaios de deformação controlada.

Apesar disso, as curvas nas diferentes temperaturas apresentaram proximidade, especialmente para baixos níveis de deformação. A curva característica de dano (C vs. S) é apresentada na Figura 15.

A integridade da curva de temperatura de 30°C apresenta queda suave e absorve dano maior em relação a temperatura de 20°C. Estes resultados corroboram com o encontrado na Figura 14 (b), onde o Nf da temperatura de 30°C foi maior em relação a temperatura de 20°C. Este comportamento é esperado para ensaios de deformação controladas, onde temperaturas mais altas suportam danos maiores antes da ruptura.

3.3 PROJETO DAS MISTURAS

Para esta pesquisa foram consideradas duas variações de condição das misturas asfálticas: a distribuição granulométrica e o volume de vazios, por meio de mudança no teor de ligante (sendo mantida a mesma energia de compactação). Foram selecionadas as distribuições granulométricas contínua, considerando um Concreto Asfáltico (CA); descontínua, considerando um gap-graded (GAP); aberta, considerando uma mistura do tipo Camada Porosa de Atrito (CPA) e semi-descontínua (SD). As curvas granulométricas das misturas são apresentadas na Figura 16, de acordo com os limites de faixas estabelecidas pelo DNIT.

Figura 16 – Curvas granulométricas das misturas asfálticas: (a) Contínua; (b) Semi-descontínua; (c) Descontínua; (d) Aberta

Fonte: Autora (2020)

A mistura semi-descontínua considerada na pesquisa é uma proposta de variação granulométrica como tentativa de melhorar a textura superficial da mistura asfáltica, aliado ao bom comportamento mecânico e tem sido utilizada pela concessionária parceira deste estudo em obras de restauração. Nesta granulometria, uma descontinuidade foi introduzida na curva, destacada na peneira de número 4 (4,8mm), e atende a uma distribuição intermediária entre as misturas CA e GAP, como evidenciado na Figura 17. É notável que a curva acaba saindo dos limites

estabelecidos pela Faixa C do DNIT, porém, a concessionária possui norma interna onde as misturas CA e SD se encaixaram na faixa de concreto asfáltico.

Figura 17 – Granulometrias de projeto

Fonte: Autora (2020)

As granulometrias citadas foram projetadas em seus volumes de vazios comumente adotados, sendo aproximadamente 4% para contínua e semi-descontínua, 5.5% para descontínua e 19% para aberta. Dentre as misturas citadas, as granulometrias contínua e semi-descontínua foram escolhidas para o estudo da variação do volume de vazios.

Para embasar esta variação de volume de vazios, considerou-se os limites estabelecidos pelo DNIT para o grau de compactação em campo, que varia de 97% a 101%. Os projetos são feitos para 96% da densidade máxima do material, o que resulta em 4% de vazios na mistura; considerando o limite inferior de compactação de 97% para 96% da densidade, gera-se uma mistura de 7% de vazios, e, para o limite superior de 101%, gera-se uma mistura com 3% de vazios. Desta forma, além dos 4% de volume de vazios adotados para as misturas CA e SD, adotaram-se também valores próximos a 3% e 7% de vazios. A matriz de misturas asfálticas estudadas está representada na Tabela 5.

Tabela 5 – Matriz de misturas asfálticas estudadas

Granulometria	Tipo	Nome	Vv (%)	Teor de ligante (%)	VAM (%)	VCA (%)	Gmm (g/cm ³)	Gmb (g/cm ³)
Contínua	Concreto Asfáltico	CA	4,0	4,7	13,8	71,1	2,486	2,387
		CA+	7,0	4,0	14,9	54,4	2,511	2,34
		CA-	2,8	5,2	13,9	79,9	2,466	2,397
Semi-Descontínua	Concreto Asfáltico	SD	4,0	5,0	14,4	72,2	2,476	2,377
		SD+	6,5	4,3	15,0	56,6	2,505	2,342
		SD-	3,0	5,5	14,5	79,3	2,46	2,386
Descontínua	Gap-Graded	GAP	5,6	5,5	16,7	66,5	2,463	2,325
Aberta	Camada Porosa de Atrito	CPA	19,0	4,4	26,4	28,1	2,502	2,027

Vv: Volume de vazios; VAM: Vazios do Agregado Mineral; VCA: Vazios Cheios de Asfalto.

Fonte: Autora (2020)

Geralmente, as metodologias Bailey ou FAD são utilizadas na etapa de projeto das misturas asfálticas, de modo a verificar o intertravamento do esqueleto pétreo. No entanto, nesta pesquisa, utilizou-se ambos os métodos apenas como ferramenta de estudo, e não como critério de seleção de granulometria.

A metodologia Bailey faz uso dos critérios de proporção de agregado graúdo (AG), proporção graúda dos agregados finos (GAF) e proporção fina dos agregados finos (FAF). Esses critérios são calculados de acordo com o tipo da mistura asfáltica (comportamento graúdo, comportamento fino ou *Stone Matrix Asphalt*, SMA) e com peneiras de controle, conforme o tamanho máximo nominal (TMN) de cada mistura. Informações mais detalhadas sobre a metodologia Bailey podem ser encontradas em Vavrik et al. (2002).

Foram avaliadas as misturas de granulometria contínua, semi-descontínua e gap-graded, e todas foram caracterizadas como de comportamento graúdo, uma vez que a maioria das partículas ficaram retidas na peneira de 4.75mm e não atendem

critérios para SMA. Os resultados para cada mistura e os limites estabelecidos pelo método Bailey são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados da metodologia Bailey				
		AG	GAF	FAF
Limites	9,5mm	0,4-0,55	0,35-0,55	0,35-0,5
	12,5mm	0,5-0,65		
Resultados	SD (9,5mm)	0,19	0,52	0,56
	CA (12,5mm)	0,59	0,54	0,54
	GAP (12,5mm)	0,54	0,54	0,57

Fonte: Autora (2020)

De acordo com os resultados do método Bailey, nenhuma das misturas deveria ser selecionada, e o não atendimento dos limites indicam intertravamento inadequado do esqueleto pétreo das misturas, o que pode significar baixa resistência à deformação permanente.

As misturas também foram avaliadas pelos critérios da metodologia FAD, de acordo com a interação entre peneiras, a própria Faixa de Agregados Dominante e a porosidade FAD. A interação entre peneiras está apresentada na Figura 18.

Figura 18 – Diagrama de interação entre peneiras

Fonte: Autora (2020)

Kim (2006) considera que quando a proporção entre as porcentagens retidas excede o valor de 70/30 (2,33), as partículas de menor proporção estão tão espaçadas que passam a flutuar dentro da matriz formada pelas partículas de maior proporção. Todas as misturas estudadas apresentaram o mesmo comportamento, com interação apenas entre peneiras de 12,5 e 9,5mm e entre peneiras de 2,36 e 1,18mm. Nesses casos, considera-se na FAD apenas a interação de menor porosidade. A Tabela 7 mostra as determinações de FAD e a porosidade FAD para todas as misturas.

Tabela 7 – FAD e porosidade FAD de todas as misturas

Mistura	FAD	Porosidade FAD
CA	2,36 - 1,18	34,9%
CA+	2,36 - 1,18	35,5%
CA-	2,36 - 1,18	35,1%
SD	2,36 - 1,18	32,1%
SD+	2,36 - 1,18	32,4%
SD-	2,36 - 1,18	32,3%
GAP	2,36 - 1,18	31,6%

Fonte: Autora (2020)

Apesar de as misturas apresentarem baixa interação entre as peneiras, todas as misturas apresentaram valores de porosidade FAD abaixo de 50%, valor limite estabelecido por Kim (2006) para garantia da existência de contato adequado entre os grãos, e, assim, boa resistência à deformação permanente. Dessa forma, considerando este método, espera-se que as misturas apresentem bom comportamento quanto à deformação permanente, confrontando com os resultados encontrados pelo método Bailey.

É válido ressaltar que Greene et al. (2014) traz recomendação de porosidade FAD na faixa de 38% a 48% para garantia de adequado intertravamento entre os agregados, e desse modo, boa resistência à deformação permanente. Nesse caso, todas as misturas estariam abaixo do valor mínimo estipulado, indicando suscetibilidade quanto à deformação permanente.

3.4 EXECUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL E CONTROLE TECNOLÓGICO

O trecho experimental foi executado em duas etapas nos dias 08 e 09 de junho de 2018. As etapas consistiram no processo de fresagem de 5cm do revestimento antigo, limpeza da área, execução de pintura de ligação, lançamento de nova mistura asfáltica por vibroacabadora, seguido de compactação por rolo de pneus e rolo liso, executadas em extensão de aproximadamente 500m em cada um dos dias de obra (Figura 19).

Figura 19 – Etapas de execução do trecho experimental: (a)(b) Fresagem do revestimento antigo; (c)(d) Limpeza da superfície fresada; (e) Pintura de ligação; (f) lançamento da mistura asfáltica por vibroacabadora; (g) Compactação por rolo de pneus; (h) Compactação por rolo liso vibratório*

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

*Os segmentos de mistura descontínua e semi-descontínua não contaram com o processo de compactação por rolo vibratório.

Fonte: Autora (2020)

(h)*

O trecho experimental foi contruído num total de 1,080km, dividido em oito segmentos, conforme a Figura 20. Todas as misturas possuem espessura de 5cm, com exceção do CPA, que possui 4cm.

Figura 20 – Croqui do trecho experimental

Fonte: Autora (2020)

Para conhecimento da estrutura remanescente do trecho experimental, foi aberto um poço de inspeção, no acostamento da via. A estrutura encontrada é apresentada na Figura 21.

Figura 21 – Estrutura remanescente: (a) caracterização das camadas; (b) poço de inspeção

Fonte: Autora (2020)

Durante a execução do trecho foram coletadas amostras da mistura asfáltica solta direto da vibroacabadora e extraídos corpos de prova da camada de revestimento

asfáltico compactada (Figura 22) para controle tecnológico (verificação da densidade, teor de ligante e volume de vazios).

Figura 22 – Coleta de amostras: (a) massa asfáltica da vibroacabadora; (b) corpos de prova do revestimento compactado

(a)

(b)

Fonte: Autora (2020)

A determinação do teor de ligante asfáltico foi feito seguindo a norma ASTM D6307-16 pelo método da ignição. Com a amostra coletada da vibroacabadora, foram colocadas duas porções previamente pesadas, em recipientes adequados para exposição ao calor da mufla. As amostras foram submetidas a 540°C por cerca de 4 horas, e, após, foram retiradas e pesadas (Figura 23). Com a relação de peso entre o material coletado e o material após ignição, calculou-se o teor de ligante asfáltico. Ressalta-se que o procedimento de cálculo do teor de ligante asfáltico considera a água de constituição do agregado, de modo que o mesmo procedimento foi feito na mufla utilizando amostra de agregado virgem. Os valores finais de teor de ligante asfáltico são apresentados na Tabela 8.

Figura 23 – Ensaio para determinação do teor de ligante asfáltico da mistura: (a) mistura no início do ensaio; (b) agregado após ignição

Fonte: Autora (2020)

Tabela 8 – Teor de ligante asfáltico das misturas

Nome	Teor de ligante asfáltico		Diferença
	<i>As built</i>	Projeto	
CA	4,4%	4,7%	-0,3%
CA+	3,9%	4,0%	-0,1%
CA-	4,8%	5,2%	-0,4%
SD	4,5%	5,0%	-0,5%
SD+	3,9%	4,3%	-0,4%
SD-	5,0%	5,5%	-0,5%
GAP	5,1%	5,5%	-0,4%
CPA	4,0%	4,4%	-0,4%

Fonte: Autora (2020)

Com base nos valores da diferença entre teor de ligante asfáltico de projeto e teor de ligante asfáltico de campo, verifica-se que o erro em campo ficou fora dos limites estabelecidos ($\pm 0,3\%$) em alguns segmentos, resultando em menor teor de ligante do que o projetado, para quase todas as misturas, com exceção de CA e CA+.

Com as mesmas amostras utilizadas para extração do ligante asfáltico, foi realizado o ensaio de verificação da granulometria, com lavagem do material para determinação correta dos finos. As curvas obtidas deste processo são apresentadas na Figura 24.

Figura 24 – Curvas granulométricas das misturas *as built* comparadas as de projeto: (a) Contínua; (b) Semi-descontínua; (c) Descontínua; (d) Aberta

Fonte: Autora (2020)

Pelo controle tecnológico, evidencia-se uma alteração na peneira de descontinuidade (número 4) da mistura SD, situando as curvas granulométricas das misturas *as built* acima do limite superior estabelecido para a Faixa C do DNIT. A mistura CA apresentou desacordo entre a curva granulométrica e o limite superior na mesma peneira, número 4. As demais misturas situaram-se dentro da faixa de trabalho estabelecida pelo DNIT, com valores próximos ao limite inferior, especialmente na região de finos da curva, para as misturas GAP e CPA.

As misturas CA e SD que tiveram variação de volume de vazios deveriam apresentar mesma granulometria, pois a variação de volume de vazios foi feita variando-se o teor de ligante nas misturas. No entanto, é possível observar uma pequena diferença entre elas, que pode ser devido ao próprio procedimento de usinagem, e/ou falta de acurácia do ensaio de granulometria em laboratório, que considerou apenas duas amostras.

Foi determinada a massa específica máxima medida, de acordo com a norma ABNT 15619 (2016). O procedimento consistiu em, com a amostra coletada na execução do trecho, destorroar o material, colocá-lo no kitassato com quantidade de água destilada suficiente para cobrimento do material, submeter à agitação e preencher com água destilada até garantir a ausência de ar (Figura 25). Com os valores de pesagens, determina-se o valor de massa específica máxima medida. Os valores para cada uma das misturas asfálticas são apresentados na Tabela 9.

Figura 25 – Determinação da densidade máxima medida: (a) Amostra coberta com água destilada; (b) Kitassato com amostra em processo de agitação; (c) Preenchimento do kitassato com água destilada

Fonte: Autora (2020)

Tabela 9 – Resultados de Gmm para as misturas asfálticas

Nome	Gmm
CA	2,462
CA+	2,483
CA-	2,449
SD	2,476
SD+	2,437
SD-	2,443
GAP	2,459
CPA	2,490

Fonte: Autora (2020)

Com uso dos corpos de prova extraídos de campo, foi determinado o volume de vazios das misturas. Foram utilizadas cinco amostras por segmento para esta determinação, e o procedimento contou com a serragem das amostras para nivelamento e pesagem hidrostática (Figura 26).

Figura 26 – Determinação do volume de vazios (a) Amostras extraídas de campo (b) Pesagem hidrostática de amostra

(a)

(b)

Fonte: Autora (2020)

O cálculo foi feito considerando o valor de Gmm determinado para a mistura asfáltica coletada na data da obra, conforme procedimento descrito anteriormente neste item. A Tabela 10 apresenta a média do volume de vazios obtido em campo

para os oito segmentos do trecho experimental, com cinco amostras extraídas por segmento, considerando coeficiente de variação inferior a 30%.

Tabela 10 – Variação de volume de vazios entre campo e projeto

Nome	Volume de vazios		Diferença (%)
	<i>As built</i>	Projeto	
CA	6,5%	4,0%	2,50%
CA+	7,5%	7,0%	0,50%
CA-	3,7%	2,8%	0,90%
SD	7,9%	4,0%	3,90%
SD+	7,7%	6,5%	1,20%
SD-	5,2%	3,0%	2,20%
GAP	8,8%	5,6%	3,20%
CPA	10,9%* 22,8%**	19,0%	-8,10%* 3,8%**

*Vv calculado considerando pesagem hidrostática;

**Vv calculado considerando método do volume.

Fonte: Autora (2020)

Constatada a grande diferença de volume de vazios entre projeto e campo, optou-se por reduzir a matriz de estudos a seis misturas. Assim, foram desconsideradas das análises de campo as misturas CA e SD, devido à proximidade de volume de vazios com outra mistura de mesma granulometria.

4 ANÁLISES LABORATORIAIS

Conforme dados obtidos na etapa de controle tecnológico, verificou-se que a variação de volumetria em campo para as misturas CA e SD não atingiu os valores definidos em projeto. Assim, o estudo laboratorial foi realizado de maneiras diferentes para cada experimento, variando os parâmetros que foram executados em campo e parâmetros definidos em projeto na produção das amostras.

4.1 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Para as análises de comportamento mecânico das misturas asfálticas, foi excluída a mistura do tipo CPA, que para este projeto foi considerada sem função estrutural. Assim, este item do trabalho é composto pelas misturas CA, CA+, CA-, SD, SD+, SD- e GAP.

4.1.1 Propriedades viscoelásticas lineares

Para caracterização da rigidez das misturas asfálticas estudadas, foi realizado o ensaio de módulo dinâmico, seguindo a norma AASHTO T342-11. As amostras para realização deste ensaio foram compactadas em laboratório por meio de Compactador Giratório Superpave (CGS), com dimensões de 100mm de diâmetro e 170mm de altura, contando com serragem de topo e base para regularização da altura em 150mm. Para preparação das amostras foram adotados os parâmetros de acordo com o *as built* do trecho experimental (Tabela 11), a diferença entre volume de vazios para misturas de mesmo teor de ligante foi induzida pela variação da massa de mistura asfáltica, com mesmo número de giros para todas as misturas. Após compactação e serragem, as amostras foram capeadas com gesso, a fim de garantir uma superfície lisa de contato entre o atuador e a amostra durante a realização do ensaio.

Tabela 11 – Características dos corpos de prova do ensaio de Módulo Dinâmico

Tipo	Vv	Teor de ligante
CA	8,8%	3,9%
CA	7,6%	3,9%
CA	4,5%	4,8%
CA	5,4%	4,8%
SD	8,4%	3,9%
SD	8,6%	3,9%
SD	7,3%	5,0%
SD	7,0%	5,0%
GAP	9,0%	5,1%
GAP	9,2%	5,1%

Fonte: Autora (2020)

O ensaio de Módulo Dinâmico foi conduzido em tensão controlada, garantindo carregamentos que resultassem em deformações entre 50 e 150 $\mu\epsilon$, para assegurar a obtenção de propriedades na zona de viscoelasticidade linear do material. Os carregamentos foram aplicados em diferentes frequências (25; 10; 5; 1; 0,5 e 0,1Hz) e temperaturas (4,4; 21,1; 37,8 e 54°C) (Figura 27).

Figura 27 – Ensaio de Módulo Dinâmico

Fonte: Autora (2020)

Para determinação das curvas mestras do módulo dinâmico, foi calculado o *shift factor* para cada temperatura, e as curvas foram então deslocadas para uma temperatura de referência, 21,1°C. Para ajuste das curvas, foi utilizado o modelo sigmoidal proposto por Pellinen et al. (2004), conforme Equação 1, equação polinomial do *shift factor* (Equação 2) e cálculo da frequência reduzida (Equação 3). Os resultados são apresentados na Figura 28.

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1+e^{\beta-\gamma\log(f_r)}} \quad (1)$$

$$\log(a_T) = \alpha_1 T^2 + \alpha_2 T + \alpha_3 \quad (2)$$

$$\log(f_r) = \log(f) + \log(a_T) \quad (3)$$

Onde:

$|E^*|$ = módulo dinâmico;

f_r = frequência reduzida;

δ , α , β e γ = coeficientes do modelo sigmoidal;

a_T = *shift factor* na temperatura T;

α_1 , α_2 , α_3 = coeficientes da equação polinomial do *shift factor*;

T = temperatura;

f = frequência do ensaio.

Figura 28 – Curvas mestras do módulo dinâmico para diferentes volumetrias das misturas: (a) CA (b) SD (c) GAP

(b)

(c)

Fonte: Autora (2020)

Para as misturas de concreto asfáltico, fica evidente a influência da volumetria, especialmente em altas frequências, de modo que quanto maior o volume de vazios da mistura, menor o módulo dinâmico. Isto pode indicar que em temperaturas mais

baixas, misturas de maior volume de vazios (menor teor de ligante asfáltico) apresentam menor rigidez. Este comportamento não é observado na mistura semi-descontínua, onde as curvas se sobrepõem, indicando que esta granulometria sofreu menor influência na rigidez pela variação volumétrica estudada. Neste caso, destaca-se que a variação de volume de vazios atingida no caso da mistura semi-descontínua é menor do que a faixa estudada na mistura contínua, o que pode ser uma explicação para os diferentes comportamentos observados. Na mistura gap-graded, a variação de volumetria foi muito pequena, considerando um mesmo teor de ligante, de modo que as diferenças entre as curvas podem ser interpretadas como variabilidade de corpos de prova. As diferenças entre granulometrias podem ser observadas na Figura 29.

Figura 29 – Curvas mestras do módulo dinâmico para diferentes granulometrias

Fonte: Autora (2020)

Comparando as diferentes misturas, pode-se perceber que os valores de módulo dinâmico são mais influenciados pela variação de volumetria do que granulometria das misturas estudadas. Destacam-se os menores volumes de vazios (4,5% e 5,4%) da mistura de concreto asfáltico, com valores superiores de módulo dinâmico; e o maior volume de vazios (9,2%) da mistura gap-graded, com valor inferior de módulo dinâmico. As misturas de diferentes granulometrias, com volume de vazios entre 7,6% e 9,0%, apresentam as curvas sobrepostas, de modo que as variáveis de granulometria e volume de vazios estudadas não apresentam variação na rigidez.

Para complementar a análise de propriedades viscoelásticas lineares das misturas, considerando temperatura de referência de 21,1°C, as curvas mestras do ângulo de fase (Figura 30 e Figura 31), plano Cole-Cole (Figura 32 e Figura 33) e Black Space são apresentadas (Figura 34 e Figura 35).

Figura 30 – Curvas mestras do ângulo de fase para diferentes volumetrias das misturas: (a) CA (b) SD (c) GAP

(c)

Fonte: Autora (2020)

Considerando as variações de volumetria entre misturas de mesma granulometria, poucas diferenças são observadas, de modo que as curvas mestras do ângulo de fase se encontram muito próximas umas das outras. A Figura 31 mostra todas as curvas mestras de ângulo de fase.

Figura 31 – Curvas mestras de ângulo de fase de diferentes granulometrias

Fonte: Autora (2020)

As curvas mestras de ângulo de fase de todas as misturas se apresentam sobrepostas, impossibilitando conclusões a respeito das variações de granulometria e volumetria propostas. Este comportamento indica que, quanto às propriedades elásticas e viscosas dos materiais, não houve influência por variação de granulometria ou volumetria das misturas.

Figura 32 – Plano Cole-Cole para diferentes volumetrias das misturas: (a) CA (b) SD (c) GAP

(c)

Fonte: Autora (2020)

Para as misturas de concreto asfáltico e gap-graded, é possível notar maiores valores de E'' para os menores valores de volume de vazios, o que indica comportamento mais viscoso para estes casos, provavelmente devido ao maior teor de ligante asfáltico. Para a mistura semi-descontínua não é possível concluir, uma vez que as curvas se misturam, não apresentando tendência clara. A Figura 33 mostra o plano Cole-cole para as diferentes granulometrias.

Figura 33 – Plano Cole-cole para diferentes granulometrias

Entre as granulometrias, há sobreposição das curvas para a maioria dos casos. Destaca-se a mistura de concreto asfáltico, com maiores valores de E'' , especialmente em menores volume de vazios, indicando maior comportamento viscoso.

Figura 34 – Black Space para diferentes volumetrias das misturas: (a) CA (b) SD (c) GAP

Fonte: Autora (2020)

Mais uma vez, as curvas se sobrepõem de modo a impossibilitar conclusões quanto a influência da variação na volumetria. A Figura 35 mostra todas as curvas juntas.

Figura 35 – Black Space para diferentes granulometrias

Fonte: Autora (2020)

Do mesmo modo, a sobreposição das curvas no Black Space indica que as propriedades viscosas e elásticas das misturas estudadas não são afetadas pela variação granulométrica ou volumétrica.

No geral, para a caracterização das propriedades viscoelásticas lineares, é possível observar, em todas as representações feitas, que as variáveis de granulometria e volumetria estudadas não levam a grandes diferenças. As misturas de menor volume de vazios se destacaram em algumas representações indicando maior módulo dinâmico e maior parcela viscosa, o que provavelmente se deve ao maior teor de ligante asfáltico. É válido ressaltar que este tipo de comportamento pode indicar maior suscetibilidade a deformações plásticas. No entanto, é necessário destacar que, de acordo com Leandro (2016), a rigidez, embora seja de grande importância para a caracterização do material estudado, nem sempre está diretamente relacionada ao comportamento quanto à deformação permanente, ou à fadiga.

4.1.2 Deformação permanente

4.1.2.1 Preparação das amostras

As amostras foram preparadas para o ensaio de deformação permanente e para ensaios de textura superficial, por este motivo, a mistura de CPA foi incluída na matriz de amostras preparadas, mas não teve resultados de deformação permanente. A produção em laboratório seguiu os parâmetros de projeto das misturas, com uso de mesa compactadora da metodologia francesa, que faz uso de pneu liso, e as amostras apresentam dimensões finais de 180x500x50mm, de acordo com a norma EN 12697-33 (2003).

Utilizou-se, além do método convencional de compactação, uma metodologia proposta pelo Laboratório de Tecnologia em Pavimentação (LTP), utilizada de modo similar em trabalho anterior (CARVALHO, 2019), que leva em conta um processo de vibração da amostra durante sua compactação. Este método foi proposto na intenção de aproximar à compactação em campo, buscando simular o que ocorre por meio de rolo liso vibratório.

O método padrão da mesa compactadora consiste nas etapas de (i) pré-compactação com pneu liso com pressão de inflação de 0,1MPa e carga de 1kN; e (ii) compactação com pneu liso com pressão de inflação de 0,6MPa e carga de 5kN. O método com vibração consiste na utilização de processo de vibração intercalado com o método padrão, de acordo com a sequência: (i) pré-compactação com o pneu liso (0,1MPa, 1kN); (ii) com uma placa metálica lisa posicionada em cima da amostra pré-compactada, utiliza-se motovibrador para vibração da mistura por 1 minuto, na frequência de 35Hz; (iii) procedimento de compactação com pneu liso de acordo com a metodologia convencional (0,6MPa, 5kN); (iv) com o motovibrador posicionado diretamente na amostra compactada, vibra-se durante 30 segundos, numa frequência de 25Hz (Figura 36). Detalhes das amostras são ilustrados na Tabela 12.

Figura 36 – Compactação de amostras em laboratório: (a) método convencional com pneu liso; (b) método com vibração, motovibrador em cima de placa metálica (c) motovibrador na etapa final, diretamente na amostra

(b)

(c)

Fonte: Autora (2020)

Tabela 12 – Matriz de amostras produzidas

Mistura	Volume de vazios	Teor de ligante	Compactação	Número de amostras
CA	4,0%	4,7%	Vibrada	3
			Padrão	3
CA+	6,8%	4,0%	Vibrada	3
			Padrão	3
CA-	2,8%	5,2%	Vibrada	3
			Padrão	3
SD	4,0%	5,0%	Vibrada	3
			Padrão	3
SD+	6,5%	4,3%	Vibrada	3
			Padrão	3
SD-	3,0%	5,5%	Vibrada	3
			Padrão	3
GAP	5,6%	5,5%	Vibrada	3
			Padrão	3
CPA	19,0%	4,4%	Vibrada	3
			Padrão	3
Total de amostras:				48

Fonte: Autora (2020)

4.1.2.2 Simulador de tráfego

Considerando duas amostras por condição, os ensaios de deformação permanente foram realizados no simulador de tráfego do tipo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC), seguindo a norma EN 12697-22 (2008). O procedimento consiste na passagem de um pneu liso, com pressão de inflação de 0,6MPa, e carga de ensaio de 5kN, sobre a amostra condicionada a 60°C, na frequência de 1Hz, com medições em 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos acumulados (Figura 37).

Figura 37 – Simulador de tráfego LCPC: (a) Uma das amostras posicionada com pneu suspenso (b) Medição de afundamentos

(b)

Fonte: Autora (2020)

Os resultados de afundamento de trilha de roda para cada tipo de mistura asfáltica em diferentes condições de compactação (padrão, P, e vibrada, V) e de volume de vazios são apresentados na Figura 38, Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 42.

Figura 38 – Resultados de afundamento de trilha de roda para o par de amostras da mistura do tipo concreto asfáltico para ambos método de compactação (a) $V_v = 2,8\%$ (b) $V_v = 4,0\%$; (c) $V_v = 6,8\%$

(a)

(b)

(c)

Fonte: Autora (2020)

Ambos os tipos de compactação apresentam os resultados de afundamento de trilha de roda muito similares em todos pontos de medição. Os resultados iguais para diferentes métodos de compactação podem estar relacionados ao empacotamento das partículas provido pela granulometria contínua, onde agregados menores preenchem os vazios existentes entre os agregados maiores, de modo que o método de compactação não seja capaz de interferir neste resultado.

Figura 39 – Resultados de afundamento de trilha de roda para o trio de amostras da mistura do tipo concreto asfáltico para $V_v = 2,8\%$; $V_v = 4,0\%$; $V_v = 6,8\%$ em métodos de compactação (a) Vibrado (b) Padrão

A tendência observada entre as variações de volume de vazios é a mesma considerando os dois tipos de compactação, maiores valores de afundamento para a condição de volume de vazios de 4,0%, seguido dos valores de 6,8% e os menores valores de afundamento, para o caso de volume de vazios em 2,8%. Nesta análise, é válido ressaltar que o método de compactação com a metodologia francesa tende em resultar em valores de volume de vazios mais altos que o projeto, e neste estudo, não foram medidos os valores de volume de vazios após a compactação. Apesar da possível diferença de valores, considera-se que a proporção entre eles ainda seja válida.

Dessa forma, pode-se concluir, para as misturas e variações volumétricas estudadas, que o menor volume de vazios, com maior teor de ligante asfáltico, conferiu maior estabilidade às misturas, por ambos métodos de compactação. Aqui ressalta-se que o valor de volume de vazios utilizado como convencional, de 4,0%, não pode ser considerado “ótimo” para as misturas. Dados os resultados do menor volume de vazios (2,8% e 3,0%), o teor de ligante asfáltico utilizado ainda não

estava agindo como lubrificador entre as partículas, de modo que as misturas apresentaram melhor resistência à deformação permanente, o que ratifica que o teor de 4,0% não poderia ser considerado “ótimo”.

Apesar de as misturas com maior volume de vazios (4,0% e 6,8%) terem apresentados valores mais altos de afundamento, ainda estão dentro dos limites estabelecidos por Moura (2010) para misturas típicas brasileiras, de 5%. Assim, pode-se afirmar que a mistura de granulometria contínua, mesmo com variação de volume de vazios, apresenta adequada resistência à deformação permanente.

Figura 40 – Resultados de afundamento de trilha de roda para o par de amostras da mistura do tipo semi-descontínua para ambos método de compactação (a) $V_v = 3,0\%$ (b) $V_v = 4,0\%$; (c) $V_v = 6,5\%$

(b)

(c)

Fonte: Autora (2020)

Assim como observado para a mistura de concreto asfáltico, os valores de afundamento de trilha de roda são muito similares quando comparados os métodos de compactação, com variação no resultado de 30.000 ciclos de até 0,5%.

Figura 41 – Resultados de afundamento de trilha de roda para o trio de amostras da mistura do tipo semi-descontínua para $V_v = 3,0\%$, $V_v = 4,0\%$, $V_v = 6,5\%$ em métodos de compactação (a) Vibrado (b) Padrão

(a)

(b)

Em relação a tendência de acordo com a variação de volume de vazios, o mesmo acontece para ambos os processos de compactação: mistura com volume de vazios de 4,0% apresenta os maiores afundamentos, assim como observado no caso do concreto asfáltico. As misturas com 6,5% e 3,0% de volume de vazios apresentaram valores inferiores de afundamento de trilha de roda, o que indica maior resistência à deformação permanente. Apesar das diferenças de valores finais, apenas a mistura SD (V) apresentou valor acima (5,3%) do indicado para misturas brasileiras (5%).

Figura 42 – Resultados de afundamento de trilha de roda para o par de amostras da mistura do tipo gap-graded para ambos métodos de compactação

Fonte: Autora (2020)

A mistura GAP em compactação padrão apresenta 0,9% de deformação a menos do que a mesma mistura em compactação vibrada após 30.000 ciclos. Esta redução na resistência à deformação permanente pode ser relacionada à alguma mudança na estrutura interna da mistura, resultante da vibração da amostra. Neste caso, pode-se relacionar os métodos de compactação e seu efeito na mistura descontínua com o método construtivo.

Para evitar segregação da camada e garantir o esqueleto pétreo do modo desejado, em misturas descontínuas, a compactação em campo é feita apenas com rolo liso estático, sem vibração (BERNUCCI et al., 2010). Fica identificada, portanto, a maior suscetibilidade à deformação permanente em misturas descontínuas com a adição de um processo de vibração. Carvalho (2019) detectou menor resistência à deformação permanente para mistura do tipo gap-graded quanto utilizado o processo de compactação com vibração.

Por fim, a Figura 43 apresenta a comparação entre misturas e volumes de vazios, para cada um dos tipos de compactação utilizados.

Figura 43 – Resultados de afundamento de trilha de roda para o par de amostras de todas as misturas para método de compactação (a) vibrado (b) padrão

(a)

(b)

As diferenças entre granulometrias ficam pouco evidenciadas pelos resultados de afundamento de trilha de roda. O destaque de menores valores, ou seja, maior resistência à deformação permanente, fica para as misturas de concreto asfáltico na condição de menor volume de vazios e mistura semi-descontínua nas condições de maior e menor volume de vazios, para ambos os métodos de compactação, vibrado e padrão. Por outro lado, a mistura semi-descontínua em condição ótima de volume de vazios, concreto asfáltico em condição ótima de volume de volume de vazios e gap-graded, apresentam os maiores valores de afundamento de trilha de roda, isto é, maior suscetibilidade à deformação permanente.

Relembrando, nenhuma das amostras atendeu aos critérios estabelecidos pelo método Bailey, o que indicaria intertravamento do esqueleto pétreo inadequado, resultando em baixa resistência à deformação permanente. Por outro lado, o método FAD indicou que as misturas seriam adequadas quanto ao comportamento à deformação permanente. Greene et al. (2014) com sua recomendação acerca do

método FAD, também consideraria as misturas inadequadas quanto à deformação permanente.

No entanto, apenas uma das misturas apresentou comportamento inadequado quanto à deformação permanente, com resultado acima do limite de 5,0% estabelecido por Moura (2010) para misturas asfálticas brasileiras, apresentando 5,3%. Todas as demais misturas apresentaram bom comportamento quanto à deformação permanente.

4.1.3 Fadiga

Para caracterizar o comportamento das misturas asfálticas quanto a fadiga, utilizou-se o ensaio de vigota de quatro pontos, de acordo com a norma AASHTO T 321-14. As amostras utilizadas neste ensaio têm dimensões de 380x63x50mm e são advindas da serragem de placas com dimensões originais de 500x180x100mm compactadas de modo convencional na mesa compactadora do tipo LCPC. Os ensaios de fadiga foram realizados para as misturas CA-, CA+, SD-, SD+ e GAP.

O ensaio consiste na aplicação de uma carga que gera deslocamento cíclico na área central da vigota, posicionada sobre dois pontos de suporte. Deste modo, garante-se o máximo momento constante e cisalhamento nulo na parte central da vigota, assegurando a fissuração sob estado de flexão pura durante o teste. O ensaio foi feito na temperatura de 25°C e o critério de ruptura adotado foi a redução de 50% da rigidez. A Figura 44 mostra o equipamento utilizado e a Figura 45 apresenta as curvas de fadiga.

Figura 44 – Equipamento para ensaio de fadiga

Fonte: Autora (2020)

Figura 45 – Resultados de fadiga para as amostras de laboratório

Fonte: Autora (2020)

Comparando os casos de altas deformações, é possível perceber que as misturas CA- e SD- apresentam maiores valores de vida de fadiga, em relação às mesmas misturas com mais vazios. Isto pode ser explicado pelo aumento de ligante nas misturas descontínua e semi-descontínua, o que pode ter tornado as misturas mais flexíveis, aumentando a vida de fadiga. No entanto, o mesmo comportamento não é observado para deformações menores, onde a mistura CA-, com teor de 5,2% de ligante asfáltico, apresentou valores inferiores em relação a todas as outras misturas. Neste caso, supõe-se que a granulometria pode ser responsável, de modo

que o intertravamento das partículas não aconteceu de maneira ideal, uma vez que, misturas com ainda maiores teores de ligante (SD- e GAP, teor de 5,5% em ambas) apresentaram valores bem superiores de vida de fadiga.

Percebe-se ainda, uma similaridade nas curvas SD- e GAP, que mais uma vez pode ser explicada pelos teores de ligante asfáltico iguais e as curvas granulométricas sutilmente diferentes. Por outro lado, há também semelhança entre as misturas SD+ e CA+, com teores 4,3% e 4,0% de ligante asfáltico, respectivamente, e curvas granulométricas também sutilmente diferentes.

A Tabela 13 apresenta os parâmetros das curvas de fadiga.

Tabela 13 – Parâmetros das curvas de fadiga para amostras de laboratório

	a	b
CA+	3,60E+17	4,89
CA-	2,85E+08	1,58
SD+	7,21E+19	5,79
SD-	1,65E+27	8,24
GAP	1,76E+23	6,73

Fonte: Autora (2020)

Os altos valores do parâmetro 'a' observados nas misturas SD- e GAP confirmam o pico observado nas primeiras deformações do ensaio de fadiga. No entanto, os altos valores do parâmetro 'b' indica uma grande inclinação nessas curvas, o que acaba resultando em valores inferiores a outras misturas. Um destaque é a mistura CA-, que apresentou valor do parâmetro 'a' mais baixo em relação a todas as outras misturas, porém, com parâmetro 'b' também em valor baixo, a inclinação da curva foi muito suave, resultando na maior vida de fadiga para maiores deformações.

4.2 TEXTURA SUPERFICIAL DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Para o estudo da textura superficial, todas as oito misturas foram consideradas (CA, CA+, CA-, SD, SD+, SD-, GAP e CPA). Além da granulometria e volumetria, este item do trabalho leva em consideração o modo de fabricação de amostras conforme item 4.1.2.1, isto é, foram considerados dois métodos de compactação por rolagem,

padrão e com vibração, conforme objeto de outros estudos (GEORGIU e LOIZOS, 2014; KASSEM et al., 2016; CARVALHO, 2019).

4.2.1 Macrotextura

Para avaliação da macrotextura das misturas asfálticas, foi utilizado o ensaio de Mancha de Areia, de acordo com a norma ASTM E965-15. O ensaio consiste no espalhamento de um volume de 25.000mm³ de material, neste caso, foram utilizadas microesferas de vidro (granulometria passante na peneira nº 60 e retido na peneira nº 80), com movimentos circulares. Após espalhamento, são feitas quatro medições do diâmetro do círculo final (0°, 45°, 90° e 135°), para cálculo da média destes valores (Figura 46). A medida volumétrica de material utilizado foi reduzida à metade, totalizando 12.500mm³, limitado pela dimensão das placas produzidas em laboratório. Posteriormente, foi calculado o valor de altura de mancha de areia (Hs), de acordo com a Equação 4.

$$Hs = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (4)$$

Onde:

Hs = altura de mancha de areia (mm);

V = volume de microesferas de vidro (mm³);

D = diâmetro da área de material espalhado na superfície (mm).

Figura 46 – Ensaio de mancha de areia: (a) Procedimento de espalhamento (b) Círculo final após espalhamento

(a)

(b)

Fonte: Autora (2020)

O DNIT estabelece classificações da textura superficial conforme o valor de altura de mancha de areia, conforme representado na Tabela 14. A recomendação do departamento é de que a altura de mancha de areia do pavimento deve estar entre 0,6mm e 1,2mm para adequada textura superficial.

Tabela 14 – Classificação de textura superficial conforme altura de mancha de areia

Altura de mancha de areia (mm)	Textura superficial
$H_s < 0,2$	Muito fina
$0,20 < H_s < 0,40$	Fina
$0,40 < H_s < 0,80$	Média
$0,80 < H_s < 1,20$	Grosseira
$H_s > 1,20$	Muito grosseira

Fonte: DNIT (2006)

Foram feitas três medições por amostra, distribuídas no lado esquerdo, centro e lado direito da superfície, considerando três amostras por condição de tipo de mistura e por tipo de compactação. Para apresentação dos dados, foram consideradas as três amostras por condição, exibindo a média das três medições por amostra (Figura 47).

Figura 47 – Valores de macrotextura para amostras de laboratório com diferentes granulometrias

Fonte: Autora (2020)

Entre granulometrias, observa-se: a mistura do tipo CPA com maiores valores de altura de mancha de areia, classificado como textura superficial muito grosseira ($H_s > 1,20\text{mm}$); seguido do GAP, classificado como grosseira ($0,80 < H_s < 1,20$); e os menores valores para o CA, que no caso de compactação vibrada atingiu classificação de textura superficial média ($0,40 < H_s < 0,80$). A mistura semi-descontínua (SD) apresenta valores mais altos que o concreto asfáltico, como desejado para a mistura, classificando-se como grosseira, e, para o caso de compactação padrão, chega a igualar ao valor de altura de mancha de areia da mistura descontínua (GAP), evidenciando melhora na condição de textura superficial em relação ao concreto asfáltico.

Quanto ao modo de compactação, nota-se que para todos os casos o processo de vibração causa redução no valor de altura de mancha de areia, alterando a classificação da textura superficial no caso da mistura CA. Em campo, os valores de macrotextura são geralmente menores que os medidos em laboratório (Pereira et al., 2012) desta forma, a redução dos valores com o método de compactação vibrado aproxima a textura superficial ao que ocorre em campo.

A mistura GAP apresenta menor influência do processo de vibração na compactação quanto à macrotextura. O CPA apresenta variação entre os métodos, mas deve-se atentar à barra de erro maior para o caso da compactação padrão, o que indica heterogeneidade entre os corpos de prova. Para as misturas CA e SD, a diferença entre os valores de macrotextura em relação à compactação é maior, evidenciando maior influência do processo de vibração na textura superficial destas misturas com menos vazios em relação ao gap-graded e CPA.

Levando em consideração a recomendação do DNIT para macrotextura, todas as misturas atenderam os limites, com exceção do CPA que apresentou valor superior a 1,2mm, classificando-se como muito grosseira. Vale ressaltar que ultrapassar o limite superior de macrotextura recomendada em trechos críticos pode reduzir o índice de acidentes nas rodovias.

Para o caso das misturas CA e SD, ainda foi analisada a variação de textura superficial com diferentes valores de volume de vazios. Os resultados são apresentados na Figura 48.

Figura 48 – Valores de macrotextura para amostras de laboratório com diferentes valores de volume de vazios (a) Concreto asfáltico (b) Semi-descontínua

Fonte: Autora (2020)

Nota-se que para ambas as misturas, o teor convencional de vazios na mistura ocasiona maior sensibilidade ao método de compactação, indicada pela maior

diferença de altura de mancha de areia entre os dois (CA e SD). Para o caso de mais vazios na mistura, percebe-se a menor influência do método de compactação para ambas as misturas (CA+ e SD+). Enquanto as misturas em situação de menos vazios representam variação intermediária em relação aos casos estudados (CA- e SD-).

Quanto à macrotextura, foram realizadas medições concomitantemente ao ensaio de deformação permanente, deste modo, foi possível acompanhar a evolução da textura superficial para duas amostras considerando 0, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos (Figura 49). A evolução não foi analisada para o CPA, pois esta mistura não foi submetida ao ensaio de deformação permanente, conforme já citado no item 4.1.2. Os resultados apresentados são a média de três medições em cada uma das duas amostras e cada barra corresponde às paradas de 0, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos, respectivamente.

Fonte: Autora (2020)

Ciclo a ciclo, pode-se observar que até os 3.000 ciclos, todas as misturas apresentam sutil crescimento no valor de macrotextura, porém dentro da barra de erros apresentada. Na etapa de 10.000 ciclos, diferenciam-se os comportamentos pela granulometria, isto é, mistura descontínua prossegue em elevação dos valores,

enquanto as misturas contínua e semi-descontínua decrescem, porém, novamente, os resultados encontram-se dentro da barra de erros apresentada.

A comparação direta entre as misturas antes da simulação e após os 30.000 ciclos mostra diferença entre os métodos de compactação. Enquanto as misturas compactadas com vibração apresentam crescimento no valor de altura de mancha de areia de 0 para 30.000 ciclos, as misturas compactadas no método padrão apresentaram redução no valor da macrotextura.

Carvalho (2019) em amostras produzidas pela compactação vibrada, detectou aumento da macrotextura e atribuiu à exposição dos agregados após a retirada da película de ligante asfáltico existente inicialmente nas amostras. Os resultados para os casos de compactação vibrada, corroboram com o encontrado pela autora, uma vez que, apesar da tendência não ser crescente para todos os pontos, a relação entre 0 e 30.000 ciclos é de aumento para todas as misturas.

Além da análise entre granulometrias, também se fez o mesmo procedimento para variações de volumetria. Os resultados representados na Figura 50 contemplam média de três medições em cada uma das três amostras de mistura por tipo de compactação, e cada barra representa as paradas de 0, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos, respectivamente.

Figura 50 – Resultados de macrotextura para diferentes paradas no simulador de tráfego considerando variação de volumetria das amostras (a) Concreto asfáltico (b) Semi-descontínua

(a)

(b)

Fonte: Autora (2020)

Assim como observado para as misturas anteriores, todas as misturas apresentam crescimento no valor de altura de mancha de areia após 3.000 ciclos. No entanto, a tendência após esta parada não é dependente do tipo de compactação ou volumetria das misturas, uma vez que os comportamentos foram diferentes entre si. Analisando os valores antes da simulação e após 30.000 ciclos, para quase todos os casos as misturas CA e SD se assemelham no comportamento, isto é, as misturas no teor convencional e compactação padrão reduziram os valores de macrotextura, enquanto as misturas com menos volume de vazios em ambas compactações e com mais volume de vazios em compactação padrão apresentaram crescimento do valor final de altura de mancha de areia. A exceção foi do caso de maior volume de vazios em compactação vibrada, onde a mistura SD apresentou sutil aumento, enquanto a mistura CA apresentou sutil redução.

No entanto, deve-se atentar que essas tendências são baseadas nas médias de todas as medições, isto é, os aumentos e reduções não acontecem para todas as amostras e/ou medições realizadas. Ainda, o ensaio de mancha de areia não é um

método de alta precisão, de modo que variações entre os valores podem ocorrer, sem que isso indique uma variação efetiva na macrotextura, como indicado pelo desvio padrão representado nas barras de erros. Além disso, este método vai perdendo a facilidade de execução conforme aumentam os ciclos de passagem do ensaio de deformação permanente, uma vez que é criada uma trilha de roda na amostra, o que também pode afetar os resultados.

Segundo a norma ASTM E965-15, a respeito de precisão dos dados do ensaio de mancha de areia, é razoável que aconteça: a) variação de 1% (0,01) para o mesmo operador executando o ensaio na mesma superfície repetidamente; b) variação de 2% (0,02) para diferentes operadores executando ensaios na mesma superfície repetidamente; e, c) variação de 27% (0,27) para ensaios realizados em campo. A Tabela 15 representa os dados de média e desvio padrão, considerando todas as medições (3) de todas as amostras (3), para cada condição de mistura (3) e compactação analisadas (2), antes de submeter as amostras ao simulador de tráfego (ciclo 0).

Tabela 15 – Valores médios e desvio padrão de macrotextura para as amostras

Mistura	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
CA (V)	0,77	0,07	9,3%
CA (P)	1,00	0,11	11,2%
SD (V)	0,85	0,07	7,9%
SD (P)	1,14	0,10	8,6%
GAP (V)	1,07	0,14	13,3%
GAP (P)	1,12	0,08	7,3%
CPA (V)	1,35	0,15	11,4%
CPA (P)	1,68	0,40	24,0%

Fonte: Autora (2020)

Além de a variabilidade das medidas ser superior ao 1% indicado em norma para todas as medidas, o coeficiente de variação calculado chega ao valor de 24% para o caso da mistura CPA em modo de compactação padrão, valor semelhante à variabilidade aceita na norma para medições de campo, que comumente são muito mais heterogêneas do que amostras laboratoriais. Deste modo, reforça-se que o ensaio de mancha de areia para caracterização da textura superficial de amostras não apresenta alta precisão.

4.2.2 Microtextura

Para avaliar a microtextura das misturas foi utilizado o ensaio de Pêndulo Britânico, de acordo com a norma ASTM E303-93 (2018). O equipamento consiste em um pêndulo com uma borracha na extremidade e o procedimento se resume em: limpar e molhar a superfície da amostra; liberar o pêndulo para que a borracha deslize sobre a superfície. Imediatamente, determina-se o Valor de Resistência à Derrapagem (VRD), que está relacionado com o atrito oferecido pela superfície para a passagem da borracha. Deve-se realizar este procedimento quatro vezes, a fim de se obter um valor representativo do comportamento do material (Figura 51).

Figura 51 – Medição de microtextura: (a) Equipamento de Pêndulo Britânico; (b) Realização do ensaio

Fonte: Autora (2020)

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) estabelece classificações da textura superficial conforme o valor de resistência à derrapagem, conforme representado na Tabela 16. A recomendação do Departamento é de que o valor de resistência à derrapagem do pavimento seja superior a 55, de modo a garantir adequada textura superficial.

Tabela 16 – Classificação conforme valor de resistência à derrapagem

Valor de Resistência à Derrapagem	Classe
VRD < 25	Perigosa
25 < VRD < 31	Muito lisa
32 < VRD < 39	Lisa
40 < VRD < 46	Insuficientemente rugosa
47 < VRD < 54	Medianamente rugosa
55 < VRD < 75	Rugosa
VRD > 75	Muito rugosa

Fonte: DNIT (2006)

Os resultados apresentados são advindos da média de uma medição realizada na posição central de três amostras por condição (Figura 52).

Figura 52 – Valores de microtextura para as amostras de laboratório

Fonte: Autora (2020)

Quanto a microtextura, observa-se que os valores ficaram muito próximos, variando de 69 a 77, tanto em relação ao tipo de mistura asfáltica, quanto em relação ao tipo de compactação. As misturas se classificam como rugosa ou muito rugosa, todas acima da recomendação do DNIT de 55. Esta baixa variação entre os resultados está ligada ao fato de a microtextura ser um parâmetro ligado às condições superficiais do tipo de agregado. Como foi utilizado o mesmo tipo de agregado para

todas as misturas, o parâmetro de microtextura não tem alteração, uma vez que não é influenciado por variação granulométrica.

Ainda, o ensaio foi realizado considerando alteração de volumetria das amostras, assim como no caso do item 4.2.1. Os resultados são apresentados na Figura 53.

Figura 53 – Valores de microtextura para amostras de laboratório com diferentes valores de volume de vazios (a) Concreto asfáltico (b) Semi-descontínua

(a)

Fonte: Autora (2020)

Assim como observado com a variação de granulometria, a volumetria não influencia os valores de microtextura para ambas as misturas, CA e SD. Desta forma, a granulometria, método de compactação e volumetria não influenciam o valor de resistência à derrapagem das misturas estudadas. É válido ressaltar que os agregados e o ligante asfáltico utilizados são iguais para todas as misturas, e, uma vez que a microtextura da superfície está diretamente ligada à textura do agregado, é esperado que não exista grande diferença entre as misturas.

Levando em conta que no ensaio de Pêndulo Britânico é necessário molhar a amostra, a realização de paradas no ensaio de deformação permanente, implicaria em maior tempo devido a secagem e condicionamento da amostra a 60°C. Por este motivo, a análise da microtextura em conjunto com o ensaio de deformação permanente foi feita apenas para as condições de 0 e 30.000 ciclos. A Figura 54 apresenta a evolução dos valores de microtextura, considerando uma medição por amostra, e duas amostras por condição, onde cada barra simboliza cada parada no simulador, 0 e 30.000 ciclos, respectivamente.

Figura 54 – Evolução dos valores de microtextura após simulador de tráfego

Fonte: Autora (2020)

No geral, todas as misturas apresentam redução do valor de microtextura após a passagem de 30.000 ciclos no ensaio de deformação permanente. Entre métodos de compactação, as diferenças são mais pronunciadas para o caso da compactação padrão. No entanto, tanto para 0 ciclos, quanto para 30.000 ciclos, todas as misturas permanecem sem grande variação no valor de microtextura entre elas. Isto é, a granulometria, o tipo de compactação e a ação do simulador de tráfego na superfície não exerceram influência neste parâmetro.

A mesma avaliação foi feita considerando variação de volumetria das misturas e os resultados são apresentados na Figura 55, levando em conta a média de duas amostras por condição. Cada barra representa uma parada no simulador de tráfego, 0 e 30.000 ciclos, respectivamente.

Figura 55 – Resultados de microtextura para diferentes paradas no simulador de tráfego considerando variação de volumetria das amostras (a) Concreto asfáltico (b) Semi-descontínua

(a)

(b)

Fonte: Autora (2020)

Constata-se que também para o caso de variação de volumetria, a microtextura, no geral, apresenta redução dos valores após a passagem de 30.000 ciclos, com exceção de CA+ (P) e CA- (P). Não houve tendência entre métodos de compactação ou volumetria em relação ao comportamento após simulador de tráfego.

Para todos os casos, os valores de microtextura ficaram acima de 55, obedecendo recomendação do DNIT. Desse modo, pode-se afirmar que a granulometria, a volumetria e o método de compactação não apresentam influência na microtextura e nem em sua evolução de desgaste, conforme casos estudados com uso do simulador de tráfego.

5 MONITORAMENTO DE CAMPO DO TRECHO EXPERIMENTAL

O monitoramento de campo das estruturas do trecho experimental foi realizado nos tempos de 0, 4, 6 e 12 meses a partir da data de execução. Foram realizados levantamentos quanto aos defeitos (área trincada e afundamento de trilha de roda), quanto à condição de superfície (irregularidade longitudinal, macrotextura e microtextura) e quanto ao comportamento estrutural (levantamento deflectométrico).

5.1 CORPOS DE PROVA EXTRAÍDOS

Após três meses da realização da obra, foram extraídos do eixo da pista, cinco corpos de prova de cada mistura asfáltica, com diâmetro de 100mm. Nestas amostras, após serragem para nivelamento, foi determinado o volume de vazios das amostras, por meio de pesagem hidrostática descrita no item 3.4; foi feita a caracterização da rigidez, por meio do ensaio de Módulo de Resiliência; e, foram determinadas características das misturas como quantidade e distribuição de poros na mistura por meio de tomografia.

5.1.1 Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência foi realizado em todos os cinco corpos de prova extraídos por tipo de mistura asfáltica, considerando a norma DNIT 135 (2018). A mistura CPA não foi analisada devido a pequena espessura do corpo de prova, tornando inviável a realização do ensaio, e, também, porque este tipo de mistura não possui função estrutural.

O ensaio consiste na aplicação repetitiva de cargas de compressão, na direção diametral do corpo de prova, condicionado em temperatura de 25°C (Figura 56). As deformações horizontais e verticais da amostra são medidas e utilizadas para determinação de dois valores de módulo: o instantâneo, calculado pela deformação instantânea recuperável, que ocorre durante a parte de descarregamento de um ciclo; e o total, calculado usando a deformação recuperável total, incluindo ambas, recuperação instantânea e recuperação retardada dependente do tempo, durante uma etapa de descarregamento de um ciclo.

Figura 56 – Ensaio de Módulo de Resiliência: (a) Aparato na MTS (b) Amostra posicionada

Fonte: Autora (2020)

Para análise dos dados, foram considerados os dois valores de módulo de resiliência: instantâneo e total (Figura 57). Os valores apresentados representam a média de cinco amostras por segmento.

Figura 57 – Módulo de Resiliência Instantâneo e Total dos CPs extraídos de campo

Fonte: Autora (2020)

No geral, os valores de módulo de resiliência das misturas são muito similares. Ainda, o módulo instantâneo é cerca de 30% maior em relação ao módulo total para

todas as misturas, de modo que a recuperação elástica acontece de modo semelhante para todos os casos (especialmente por ter sido usado o mesmo ligante asfáltico). Uma vez que quanto mais próximos os valores de módulo instantâneo e total, mais rapidamente acontece a recuperação elástica do material quando submetido à ação de cargas, ou seja, é desejável que o arranjo de agregados e o tipo de ligante sejam adequados para atender este requisito, especialmente em rodovias com alto volume de tráfego. (BRITO, 2006; BERNUCCI et al., 2010). Assim, pode-se afirmar que as diferenças de granulometria e volumetria estudadas não implicaram em grandes diferenças no módulo de resiliência.

5.1.2 Tomografia

A tomografia tem sido utilizada como uma importante ferramenta para análise da estrutura interna de materiais asfálticos, fornecendo informações como a porosidade, orientação das partículas, contato entre grãos, distribuição de poros no perfil do corpo de prova, e, podem ser utilizados para explicar (em parte) o comportamento mecânico da mistura (MASAD et al., 1998; GOPALAKRISHNAN et al., 2006; MERCADO, 2007; KASSEM et al., 2008; NASCIMENTO, 2008; ALVAREZ et al., 2012; KASSEM et al., 2016; MASCARENHAS, 2017; KUCHIISHI, 2019).

Este estudo contou com o auxílio do Laboratório de Instrumentação Nuclear da COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro para realização dos ensaios de tomografia nas amostras. A Tabela 17 mostra valores de porosidade das amostras medido pela tomografia e o volume de vazios medido pela pesagem hidrostática em laboratório.

Tabela 17 – Volume de vazios e porosidade das amostras

Mistura	Vv (%)		Média		Porosidade (%)	Média
CA+	6,37%		7,2%		5,7%	7,2%
	7,33%				8,0%	
	7,81%				8,0%	
CA-	3,56%		3,7%		3,1%	3,4%
	3,79%				3,5%	
	3,65%				3,6%	
SD+	7,89%		7,8%		8,9%	8,6%
	7,68%				9,5%	
	7,86%				7,4%	
SD-	5,27%		4,8%		4,7%	5,0%
	4,77%				5,5%	
	4,44%				4,9%	
GAP	8,61%		8,8%		8,8%	8,9%
	8,77%				9,3%	
	8,95%				8,5%	
CPA	11,59%*	24,6%**	11,5%*	23,3%**	12,6%	12,0%
	11,07%*	24,4%**			12,4%	
	11,75%*	21,0%**			11,0%	

*Método de cálculo por pesagem hidrostática; **Método de cálculo pelo volume.

Fonte: Autora (2020)

A tabela indica proximidade entre os valores de volume de vazios medido pelo método hidrostático em laboratório com a porosidade medida pelo tomógrafo para cada amostra e, conseqüentemente, na média. O destaque fica para a mistura CPA, uma vez que a medição hidrostática não é considerada adequada para este tipo de mistura, já que apresenta muitos vazios e a água sai muito rapidamente durante a medida da massa em condição saturada com superfície seca.

A Figura 58 apresenta os gráficos de quantidade de poros de acordo com a profundidade das amostras, onde cada linha no gráfico ilustra os dados obtidos para um corpo de prova diferente.

Figura 58 – Quantidade de poros de acordo com a profundidade da amostra (a) CA+ (b) CA- (c) SD+ (d) SD- (e) GAP (f) CPA

(a)

(b)

(c)

(d)

Fonte: Autora (2020)

(e)

(f)

Com exceção do CPA, todas as misturas tiveram três amostras analisadas, e uma das amostras é apresentada na imagem, apenas a título de ilustração. Os gráficos destacam a heterogeneidade de amostras extraídas de campo, de modo que há grande variação de quantidade de poros no perfil das diferentes amostras, ainda que sejam da mesma mistura. Devido à grande quantidade de material produzido em usina, as bateladas de mistura asfáltica usinada variam, assim, o segmento pode apresentar variações. Além disso, a temperatura de compactação, dependente da distância e tempo de viagem da usina ao trecho experimental e de condições climáticas e o esforço de compactação podem culminar em variações no pavimento final.

Gráficos ilustrando o diâmetro médio dos poros em função do volume de poros são apresentados na Figura 59.

Figura 59 – Gráfico de relação entre volume e diâmetro médio de poros (a) CA+ (b) CA- (c) SD+ (d) SD- (e) GAP (f) CPA

(a)

(b)

(f)

Fonte: Autora (2020)

Os dados apresentados de diâmetro médio dos poros em função do volume de poros reforçam a heterogeneidade existente em amostras de campo, destacando as diferenças entre amostras da mesma mistura. Apesar da heterogeneidade detectada entre amostras de mesma mistura, um comportamento de pico inicial pode ser observado em algumas misturas, como exposto na Figura 60.

Figura 60 – Volume de poros em função do diâmetro médio dos poros para determinada amostra de cada mistura.

Fonte: Autora (2020)

Este gráfico mostra uma tendência de maior volume de poros por diâmetro médio de poros na seguinte ordem: CPA, SD+, CA+, CA- e SD-, o que está ligado com o próprio volume de vazios das misturas. É possível notar um pico inicial, quando o diâmetro médio de poros é inferior a 0,5mm, o que indica maior presença de poros neste tamanho para todas as amostras. Este pico não se repete para todas as amostras, como visto na Figura 60, porém, já havia sido observada em amostras de Kuchiishi (2019). A mistura gap-graded não teve nenhuma das três amostras com o mesmo comportamento e, por este motivo, não foi apresentada.

5.2 ENSAIOS DE CAMPO

5.2.1 Levantamento deflectométrico

O levantamento deflectométrico do trecho experimental foi feito com o *Falling Weight Deflectometer*, que aplica uma carga por impacto de modo a aplicar a carga similar à de um semi-eixo padrão (Eixo Simples de Rodas Duplas, 40kN) trafegando a uma velocidade de 60 a 80km/h (Andrade, 2017). O equipamento registra os deslocamentos verticais recuperáveis que ocorrem no topo da estrutura, em determinadas distâncias pré-estabelecidas em relação ao ponto de aplicação de carga.

Os levantamentos foram feitos na posição do eixo da pista e da trilha de roda externa, para os períodos de 0, 6 e 12 meses desde a liberação da pista ao tráfego. A Figura 61 mostra os dados de deflexões máximas para todos os períodos citados, sem correção de temperatura. A correção não foi realizada devido a variabilidade alta dos dados, e a ocorrência de temperaturas muito altas nas datas de ensaio. Não foram encontrados modelos que conseguissem abranger as variabilidades encontradas, de modo que a apresentação dos dados neste trabalho foi feita sem as correções.

Figura 61 – Deflexões máximas para os tempos de 0, 6 e 12 meses: (a) eixo (b) trilha de roda externa

(a)

(b)

Fonte: Autora (2020)

Observa-se uma elevação dos valores de deflexões no período de 6 meses, enquanto os períodos de 0 e 12 meses apresentam valores médios próximos. Neste caso, deve-se ressaltar que os períodos de 0 e 12 meses correspondem ao mês de

junho, com temperatura média de levantamento de 28°C, enquanto o período de 6 meses, corresponde ao mês de dezembro, quando a temperatura média de levantamento foi de 61°C. A temperatura elevada tem influência nos valores de deflexão do pavimento, de modo que este aumento nos valores no período de 6 meses não deve ser atribuído a uma piora na condição estrutural do pavimento.

As bacias deflectométricas médias para cada um dos segmentos do trecho experimental, considerando eixo e trilha de roda externa, de todos os geofones (D_0 , D_{20} , D_{30} , D_{45} , D_{60} , D_{90} , D_{120}), sem correção de temperatura, são apresentadas na Figura 62, Figura 63 e Figura 64. Ressalta-se que a correção de temperatura não foi realizada, pois dada a magnitude de temperaturas durante o ensaio, nenhum modelo conhecido em literatura conseguiu encaixar a correção adequadamente.

Figura 62 – Bacias deflectométricas para 0 meses (Junho/2018) (a) eixo (b) trilha de roda externa

(a)

(b)

Fonte: Autora (2020)

Figura 63 – Bacias deflectométricas para 6 meses (Dezembro/2018) (a) eixo (b) trilha de roda externa

(a)

(b)

Fonte: Autora (2020)

Figura 64 – Bacias deflectométricas para 12 meses (Junho/2019) (a) eixo (b) trilha de roda externa

Fonte: Autora (2020)

Considerando a evolução das bacias deflectométricas nos períodos de levantamentos realizados, não fica clara uma tendência entre as granulometrias ou volumetrias das misturas do trecho experimental. Algumas considerações devem ser feitas quanto a estes dados: (a) há grande variabilidade entre os valores de deflexões de um mesmo segmento, de modo que a média não é representativa destes valores. Os dados são detalhados no Apêndice A; (b) a correção de temperatura, testada para diferentes equações de ajuste, não gerou bons resultados, uma vez que a temperatura do período de 6 meses, com média de 61°C

é muito elevada; (c) não se tem garantia de que a estrutura remanescente determinada por abertura de uma única janela de inspeção é a mesma para todos os segmentos; (d) a espessura de 5cm da camada em avaliação é muito delgada para avaliar de forma precisa o comportamento estrutural da mistura aplicada, de modo que há influência muito grande das camadas subjacentes; (e) problemas de drenagem identificados no trecho experimental influenciam diretamente o comportamento estrutural das camadas.

5.2.2 Afundamento de trilha de roda

As medições de afundamento de trilha de roda foram feitas por meio de treliça metálica, nos períodos de 4 e 12 meses após liberação do tráfego, isto é, outubro de 2018 e junho de 2019, respectivamente. A Figura 65 apresenta os dados desta evolução.

Fonte: Autora (2020)

O melhor comportamento fica evidenciado nas misturas CA+ e SD+, que apresentaram valores menores que 1mm após um ano de obra. A mistura descontínua, gap-graded, não apresentou o comportamento esperado, uma vez que o objetivo da introdução de descontinuidade em uma granulometria é o melhor

intertravamento de grãos, melhorando a resistência à deformação permanente. Neste caso, relembra-se que o valor obtido em laboratório, para a mistura de projeto, após 30.000 ciclos no simulador de tráfego foi de 4%, isto é, a alteração de teor de ligante (redução de 0,4%) e no volume de vazios (aumento de 3,2%) impactou negativamente o desempenho da mistura quanto à deformação permanente. Destaca-se que especialmente para misturas descontínuas, erros existentes na etapa de execução são problemáticos, e por este motivo geralmente se tem faixas granulométricas mais restritivas. Assim como visto na literatura (LINDEN e VAN DER HEIDE, 1987; MONTOYA et al., 2018), a dosagem adequada de misturas na etapa de projeto não garante o bom comportamento em campo, uma vez que erros de execução são comuns e podem comprometer a mistura, tanto na etapa de usinagem, como de compactação.

Observa-se, ainda, a relação existente entre a diminuição dos vazios (pelo aumento no teor de ligante) e o aumento do afundamento de trilha de roda no caso das misturas CA- e SD-. Os parâmetros de volume de vazios e teor de ligante asfáltico são melhor discutidos de acordo com a Figura 66.

Figura 66 – ATR com um ano de liberação ao tráfego em relação a: (a) volume de vazios; (b) teor de ligante asfáltico

Fonte: Autora (2020)

Nas misturas selecionadas para análise de volumetria (CA e SD), verifica-se forte correlação entre o aumento do afundamento de trilha de roda, a diminuição de volume de vazios e o aumento do teor de ligante. O teor de ligante mais elevado das misturas CA- e SD- (4,8% e 5,0%), que gerou os menores volume de vazios (3,7% e 5,2%), contribuiu para o aumento do afundamento de trilha de roda nestes segmentos. Pela observação da mistura gap-graded pode-se inferir que o alto teor de ligante asfáltico exerce maior influência do que o volume de vazios da mistura.

5.2.3 Área trincada

A medição da área trincada foi realizada por método de levantamento visual contínuo, conforme norma DNIT 008/2003, nos períodos de 4 e 12 meses após liberação do tráfego, isto é, outubro de 2018 e junho de 2019, respectivamente. Os dados apresentados na Figura 67 são relativos à porcentagem de área trincada, considerando a área total, para cada segmento.

Figura 67 – Evolução da área trincada nos tempos de 4 e 12 meses

Fonte: Autora (2020)

Os valores mostram que a mistura semi-descontínua (SD+ e SD-) apresentou a maior porcentagem de área trincada em comparação com os outros segmentos, independente do teor de ligante asfáltico ou volume de vazios, o que evidencia a suscetibilidade deste tipo de granulometria ao efeito de fadiga na mistura asfáltica. No entanto, deve ser pontuado que as misturas SD+ e SD- encontram-se em local de rompimento de barreira, com consequências na drenagem, o que pode ter afetado os resultados.

A descontinuidade da mistura do tipo gap-graded apresentou um bom comportamento quanto a este defeito, obtendo o menor valor de área trincada (1,4%). Destaca-se o valor de 2,5% apresentado pela mistura CPA, o que poderia

indicar um valor baixo de área trincada. Porém, dada a desagregação da camada, os resultados de área trincada baixos escondem uma avançada condição de desagregação ao final de um ano de monitoramento. Além disso, o próprio aspecto superficial deste tipo de granulometria dificulta este levantamento.

5.2.4 Irregularidade longitudinal

A irregularidade longitudinal foi medida por meio de perfilômetro a laser, seguindo a ASTM E950/E950M-09 (2015), nos períodos de 0, 6 e 12 meses desde a execução do trecho. Os dados médios por segmento por período são apresentados pelo *International Roughness Index* (IRI) na Figura 68.

Figura 68 – Evolução da irregularidade longitudinal nos tempos de 0, 6 e 12 meses

Fonte: Autora (2020)

Os valores de IRI inicialmente inferiores a 1,8 são representativos de uma superfície com conforto ao usuário na dirigibilidade em velocidades maiores de 120km/h, sem defeitos na superfície ou quaisquer ondulações perceptíveis, típico de uma estrutura

recém executada. Após 6 meses, a qualidade continuou alta, com valores máximos de 2,5, garantindo uma adequada superfície de pavimento.

Ao completar um ano de obra, o segmento CA+ apresentou o menor valor de IRI, assim como havia apresentado menores valores para afundamento em trilha de roda e área trincada, evidenciando o bom desempenho da mistura em campo. As demais misturas neste período apresentaram defeitos na superfície como painéis, afundamentos, e ondulações perceptíveis ao usuário já na velocidade de 80km/h. O maior valor de IRI foi apresentado pela mistura do tipo CPA, que nesta etapa apresentou muitas painéis, como um caso avançado de desagregação da mistura, observado já nos meses iniciais da liberação do trecho ao tráfego.

É válido ressaltar que muitos reparos foram feitos em todos os segmentos em períodos não registrados, com misturas e dimensões não identificadas.

5.2.5 Macrotextura

As diferenças entre granulometrias são perceptíveis apenas no olhar, enquanto a variação de volumetria entre as misturas é mais sutil (Figura 69). Desta forma, a caracterização da textura pelo método da mancha de areia é importante para o comparativo.

Figura 69 – Textura superficial das misturas no tempo 0: (a) CA+ (b) CA- (c) SD+ (d) SD- (e) GAP (f) CPA

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Fonte: Autora (2020)

Para a caracterização da macrotextura em campo, fez-se uso do mesmo método utilizado em laboratório (Figura 70), descrito no item 4.2.1. Não foi possível a realização do procedimento para o caso da mistura CPA, uma vez que, devido ao

alto volume de vazios, as microesferas penetram pela camada rapidamente. As medições foram feitas nos períodos de 0, 4 e 12 meses após liberação ao tráfego.

Figura 70 – Medição de macrotextura em campo

Fonte: Autora (2020)

Os valores apresentados são referentes a média de medições feitas a cada 20m para cada segmento do trecho experimental, alternadas entre trilha interna, trilha externa e eixo (Figura 71). Os dados da evolução para os períodos de 0, 4 e 12 meses também são apresentados (Figura 72).

Figura 71 – Valores de macrotextura inicial para cada mistura asfáltica (tempo 0)

Fonte: Autora (2020)

Inicialmente, os valores de mancha de areia indicam pouca diferença entre a volumetria das misturas. Já quanto à granulometria, o GAP apresenta o maior valor

de macrotextura, como esperado, e as misturas CA e SD apresentam valores similares, com leve superioridade para a mistura SD+.

Figura 72 – Evolução de valores de macrotextura de 0, 4 e 12 meses

Fonte: Autora (2020)

No período de 4 meses, as misturas GAP e SD- apresentaram tendência de elevação no valor de macrotextura, comportamento observado durante os ensaios de mancha de areia concomitantemente ao ensaio de deformação permanente em laboratório. Esta tendência pode ser melhor explorada para correlações. Já para o período de um ano, todas as misturas apresentam redução no valor de macrotextura, o que pode indicar o fechamento das granulometrias de acordo com a densificação das misturas pela ação do tráfego. A variável de volume de vazios pode fornecer mais informações para discussão dos resultados (Figura 73).

Figura 73 – Relação entre valores de macrotextura e volume de vazios das misturas

Fonte: Autora (2020)

Verifica-se relação entre o volume de vazios e os valores de macrotextura dos segmentos, de modo que quanto maior o volume de vazios, maior a altura de mancha de areia apresentada. O volume de vazios, apesar de representar a porcentagem de vazios internos da mistura, também representa vazios que a superfície pode exibir, de modo que, com mais vazios, há mais espaço para o acúmulo de água, e, durante o ensaio, acúmulo de microesferas. A única exceção à esta tendência é a mistura CA+ no tempo inicial.

Ainda, pode-se observar uma diferente na taxa de redução nos valores de macrotextura para cada uma das misturas, como apresentado na Figura 74.

Figura 74 – Redução de valores de macrotextura de 0 a 12 meses

Fonte: Autora (2020)

Nota-se que quanto mais descontínua a mistura, mais sensível à mudança de macrotextura, de modo que a maior redução é apresentada pela mistura do tipo gap graded. Entre as volumetrias de misturas de mesma granulometria, o volume de vazios menor, proporciona maior redução no valor de macrotextura.

Outro fator de influência na redução de macrotextura é o valor inicial de altura de mancha de areia. Quanto mais alto o valor inicial medido, maior a porcentagem de redução ao longo dos 12 meses. Pode-se inferir que uma macrotextura maior, proporciona mais espaço para acúmulo de sujeira e outros resíduos, o que pode resultar num fechamento de macrotextura mais rápido.

Percebe-se que a taxa de redução cresce exatamente na ordem de localização dos segmentos no trecho experimental (Figura 75). As menores porcentagens de redução são observadas para os segmentos em curva, enquanto os segmentos em tangente apresentam maiores porcentagens de redução. Um fator a ser analisado, é o maior desgaste dos pneus ocasionado pelas altas velocidades, de modo que se pode relacionar a ocorrência de curvas, com baixas velocidades, e consequente menor desgaste dos pneus (POHRT, 2019). Este desgaste dos pneus pode estar ligado ao acúmulo de partículas de borracha no pavimento, de modo que, quanto

maior a velocidade, maior o acúmulo, “fechando” a textura e reduzindo o valor de altura de mancha de areia.

Figura 75 – Localização de cada segmento

Fonte: Autora (2020)

Logo após construção do trecho experimental, além da medição de macrotextura por meio do método da mancha de areia, foi utilizado o equipamento PavScan para medição do *Mean Profile Depth* (MPD). Para fins de comparação entre os dois equipamentos, utilizou-se a Equação 5 para o cálculo do *Equivalent Texture Depth* (ETD), seguindo a norma ASTM E1845 (2015). Os resultados apresentados na Figura 76 são relativos à média das medidas a cada 10m de cada segmento para cada método de medição no tempo 0.

$$ETD = 0.2 + 0.8MPD \quad (5)$$

Figura 76 – Valores de macrotextura com diferentes métodos de medição para o tempo inicial das misturas

Fonte: Autora (2020)

Percebe-se que os valores medidos pelo PavScan seguem a mesma tendência da medição pelo método da mancha de areia, porém com valores mais altos. Observa-se também que o desvio padrão das medições é menor para o caso do PavScan, o que indica a maior precisão da medição, e evidencia a menor precisão do ensaio da mancha de areia, como já discutido no tópico 4.2.1.

5.2.6 Microtextura

As medições de microtextura foram feitas pelo equipamento de Pêndulo Britânico (Figura 77), analogamente ao ensaio laboratorial, como citado no item 4.2.2. As medições foram realizadas a cada 20m, alternados entre trilha interna, trilha externa e eixo. Ressalta-se que, a temperatura do pavimento pode afetar os resultados de microtextura (ANUPAM et al., 2013), e este fator não foi controlado nos ensaios representados neste trabalho.

Figura 77 – Medição de microtextura em campo

Fonte: Autora (2020)

Os valores de microtextura são apresentados considerando a média das medições de cada segmento (Figura 78). Também são apresentados os dados para os períodos de 0, 4 e 12 meses (Figura 79).

Figura 78 – Valores de microtextura no tempo inicial para cada mistura asfáltica

Fonte: Autora (2020)

Assim como nos resultados laboratoriais, os valores de microtextura não apresentaram variações entre as granulometrias, o que foi atribuído à utilização do mesmo agregado e tipo de ligante asfáltico para todas as misturas. A microtextura é diretamente influenciada pela textura do agregado, de modo que a utilização de um único agregado não permite a verificação de variação do parâmetro de microtextura.

Figura 79 – Evolução do valor de microtextura nos tempos de 0, 4 e 12 meses

Fonte: Autora (2020)

No período de 4 meses é possível notar queda nos valores de microtextura para todas as misturas estudadas, porém, os valores voltam a subir para o período de 12 meses. As exceções para este caso são: a mistura CA+, que apresenta redução em todos os períodos; e as misturas SD+ e SD-, que parecem entrar em um patamar entre 4 e 12 meses. Porém, no geral, todas as misturas apresentam redução no valor de microtextura quando comparados os períodos 0 e 12 meses.

Duas possibilidades são destacadas para estes resultados: (a) o aumento dos valores no período de 12 meses está relacionado à retirada da película de ligante que envolvia o agregado, de modo a deixar a textura superficial do agregado exposta, tornando a microtextura maior, o que não explicaria a redução para o período de 4 meses; (b) os ensaios foram feitos considerando diferentes operadores para cada um dos períodos analisados.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo visou analisar o efeito da variação de granulometria e volumetria no comportamento mecânico e na textura superficial de misturas asfálticas utilizadas como restauração de camada de revestimento. Para isso, foram selecionadas quatro granulometrias, variando volume de vazios em duas delas. O estudo foi dividido em etapa laboratorial, com ensaios de caracterização de comportamento mecânico e textura superficial, e etapa de campo, com monitoramento de trecho experimental, com levantamentos de superfície, de defeitos e estrutural. Com isso, algumas considerações podem ser colocadas.

6.1 ANÁLISES LABORATORIAIS

6.1.1 Propriedades viscoelásticas

- As propriedades viscoelásticas lineares das misturas não foram afetadas de forma considerável pela variação de granulometria e volumetria escolhidas para o estudo.

6.1.2 Deformação permanente

- Mistura contínua (concreto asfáltico) e semi-descontínua não apresentaram sensibilidade ao método de compactação, em nenhuma das volumetrias estudadas;
- Mistura contínua (concreto asfáltico) com menor volume de vazios (2,8%) e maior teor de ligante (5,2%), apresentou menor afundamento de trilha de roda (2,6% e 2,7%), para os métodos de compactação, vibrado e padrão, respectivamente;
- Mistura semi-descontínua com maior volume de vazios (6,5%) e menor teor de ligante asfáltico (4,3%), apresentou menor afundamento de trilha de roda (2,8% e 2,6%), para os métodos de compactação, vibrado e padrão, respectivamente;
- A mistura descontínua (gap-graded) apresentou sensibilidade ao método de compactação, com variação de 0,9%, sendo o valor mais alto (4,9%) para o

método vibrado. A maior suscetibilidade à deformação permanente ocasionada pela vibração pode estar relacionada ao método construtivo de misturas descontínuas, que não devem ser vibradas devido ao risco de segregação da massa asfáltica;

- As misturas compactadas em seu volume de vazios convencional de 4,0% para concreto asfáltico, 4,0% para semi-descontínua e 5,5% para gap-graded, foram as que ganharam destaque nos maiores valores de afundamento de trilha de roda, para ambos os métodos de compactação. Aqui destaca-se que apesar de convencional, o valor de 4,0% de volume de vazios para as misturas contínua e semi-descontínua não apresenta o valor “ótimo”, dado que a redução dos valores de volume de vazios resultou em menores valores de afundamento;
- As misturas semi-descontínuas com menor e maior volume de vazios (3,0% e 6,5%), juntamente com a mistura contínua de menor volume de vazios (2,8%) apresentaram os valores mais baixos de afundamento de trilha de roda;
- Nenhuma mistura havia sido considerada adequada pelo método Bailey, nem pelas considerações de Greene et al. (2014) em relação ao método FAD. O método clássico FAD, de acordo com Kim (2006) indica que as misturas apresentariam bom comportamento quanto à deformação permanente. Apenas a mistura semi-descontínua, com volume de vazios de 4,0%, em compactação vibrada, apresentou comportamento inadequado quanto à deformação permanente, com resultado acima do limite de 5,0% estabelecido por Moura (2010) para misturas asfálticas brasileiras, apresentando 5,3%. Todas as demais misturas apresentaram bom comportamento quanto à deformação permanente.

6.1.3 Fadiga

- Misturas com maior teor de ligante apresentaram maior vida de fadiga, em altas deformações. Já em baixas deformações, a mistura de concreto asfáltico com 5,2% de ligante asfáltico apresentou valores inferiores a todas as outras misturas;
- Misturas com teores de ligante asfáltico similares apresentaram curvas também similares, indicando maior sensibilidade ao teor de ligante asfáltico do que à granulometria das misturas.

6.1.4 Macrotextura

- O método de vibração causa redução no valor de altura de mancha de areia, o que aproxima a textura superficial do que acontece em campo;
- As misturas mais sensíveis à variação de método de compactação, quanto à textura superficial, foram concreto asfáltico e semi-descontínua;
- Os teores convencionais de volume de vazios (4,0%) das misturas contínua e semi-descontínua apresentaram a maior sensibilidade à variação de método de compactação;
- Aos 10.000 ciclos, a mistura descontínua apresenta crescimento, enquanto as misturas contínua e semi-descontínua apresentam redução no valor de macrotextura. Comportamento similar foi encontrado por Carvalho (2019) para misturas compactadas com método vibratório;
- A comparação entre as misturas após 30.000 ciclos para ambos os métodos de compactação, não apresentaram diferenças, permanecendo em valores dentro da barra de erros calculada, o que indica que o desgaste aplicado pelo pneu do simulador de tráfego não altera a textura superficial das misturas;
- O método de mancha de areia apresentou falha na repetibilidade em laboratório, apresentando valores de desvio padrão mais altos dos que os admitidos por norma.

6.1.5 Microtextura

- Devido ao uso do mesmo tipo de agregado e ligante asfáltico, as misturas não apresentaram variações de resultados para microtextura. Isto indica que este parâmetro da textura superficial não é influenciado pela volumetria, ou granulometria das misturas;
- Após simulação, todas as misturas apresentaram redução no valor de microtextura.

6.2 MONITORAMENTO DE CAMPO

6.2.1 Módulo de resiliência

- O módulo de resiliência de misturas com diferentes granulometrias e volumetrias foi muito similar, considerando amostras extraídas do campo;
- A recuperação elástica acontece de modo semelhante para todos os casos, dada a relação entre módulo instantâneo e total.

6.2.2 Tomografia

- A tomografia evidenciou a heterogeneidade das amostras extraídas de campo;
- Em algumas amostras, o gráfico de volume de poros em função do diâmetro médio dos poros indicou um pico inicial, quando o diâmetro médio de poros é inferior a 0,5mm, o que indica maior presença de poros neste tamanho para todas as amostras. Este comportamento foi encontrado também para amostras de misturas asfálticas recicladas a frio avaliadas por Kuchiishi (2019).

6.2.3 Levantamento deflectométrico

- A análise de dados de FWD para estes casos deve ser compreendida com cuidado devido a limitações: (i) espessuras das camadas analisadas muito pequena (~5cm); (ii) grande variabilidade de resultados de deflexões; (iii) incerteza das camadas subjacentes iguais para todos os segmentos; (iv) dificuldade de correção de temperatura das bacias, devido à temperatura média de 61°C na data do levantamento.

6.2.4 Afundamento de trilha de roda

- A diminuição no volume de vazios e o aumento no teor de ligante apresentaram forte correlação à ocorrência de afundamento de trilha de roda em campo;
- O melhor desempenho quanto a deformação permanente foi das misturas com maior volume de vazios para concreto asfáltico (7,5%) e semi-descontínua (7,7%), com menos de 1mm de afundamento após um ano.

6.2.5 Área trincada

- A mistura semi-descontínua apresentou suscetibilidade ao defeito de trincamento por fadiga, resultando em alta porcentagem de área trincada em campo;
- Os valores mais altos de área trincada foram observados na mistura semi-descontínua com maior volume de vazios (7,7%) e menor volume de vazios (5,2%), o que indica suscetibilidade da granulometria quanto a este defeito.

6.2.6 Irregularidade longitudinal

- O pior resultado de irregularidade longitudinal foi da mistura CPA, com pontos de desagregação avançado após um ano. Os sinais de desagregação já eram visíveis imediatamente após abertura ao tráfego, podendo estar relacionado a questões construtivas.

6.2.7 Macrotextura e microtextura

- A macrotextura e a microtextura medidas em campo apresentaram valores inferiores após um ano de obra, indicando desgaste na textura superficial;
- Foi identificada relação entre macrotextura e volume de vazios das misturas. Quanto maior o volume de vazios, maior o valor de macrotextura;
- Foram observados diferentes comportamentos em relação ao desgaste, de modo que, quanto maior a descontinuidade na granulometria da mistura, maior a sensibilidade ao desgaste, apresentando maior redução em relação ao valor inicial.
- É necessário destacar que o aparecimento de defeitos nos segmentos estudados, não devem ser atribuídos apenas às variáveis das misturas asfálticas. O trecho experimental conta com outras variáveis no estudo, como variação entre corte e aterro, existência de curva e tangente, inclinação de pista, deficiência de drenagem, incerteza do conteúdo das camadas subjacentes, caso de rompimento de barreira, problemas de execução e todas estas variáveis devem ser levadas em conta conjuntamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - AASHTO. **Guide for pavement friction**. Washington, DC. 2007.

_____. **AASHTO M 332**. Specification for performance-graded asphalt binder using multiple stress creep recovery (MSCR). American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2014.

_____. **AASHTO T342-11**. Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA). Washington, D.C., 2011.

_____. **AASHTO T321-14**. Standard method of test for determining the fatigue life of compacted asphalt mixtures subjected to repeated flexural bending. Washington, DC. 2014.

_____. **AASHTO T 19M/T 19**. Standard Method of Test for Bulk Density ("Unit weight") and Voids in Aggregate 2014 Edition. Washington, DC. 2014. 2014.

AL-HUMEIDAWI, B.H. Experimental Characterization of Rutting Performance of HMA Designed with Aggregate Gradations According to Superpave and Marshall Methods. **World Journal of Engineering and Technology**, v. 4, p. 477-487. 2016.

ALVAREZ, A.E.; CARVAJAL, J.S.; REYES, O.J. Internal structure of laboratory compacted warm-mix asphalt. **Dyna**, N172, p.38-45. Medellin, Colombia. 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1845-15**: Standard Test Method for Calculating Pavement Macrotexture Mean Profile Depth. ASTM International. Pennsylvania, United States: 2015.

_____. **ASTM E303-93**: Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester. ASTM International. 2018.

_____. **ASTM E965-15**: Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Using a Volumetric Technique. ASTM International. 2015.

_____. **ASTM E950/E950M-09**: Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer-Established Inertial Profiling Reference. ASTM International. 2018.

_____. **ASTM D6307-16**: Standard Test Method for Asphalt Content of Asphalt Mixture by Ignition Method. ASTM International. 2016.

_____. **ASTM D7369-11**: Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test. ASTM International. 2011.

_____. **ASTM C131/C131M-14**: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. ASTM International. 2014.

_____. **ASTM C128-15**, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

_____. **ASTM D2419-14**: Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate. ASTM International. 2014.

_____. **ASTM D4791-10**: Standard Test Method for Flat Particles, Elongated particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse aggregate. ASTM International. 2010.

_____. **ASTM D2872-19**, Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

_____. **ASTM D6521-19a**, Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

_____. **ASTM D7175-15**, Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

_____. **ASTM D7405-15**, Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

ANDRADE, L.R. **Comparação do comportamento de pavimentos asfálticos com camadas de base granular, tratada com cimento e com estabilizantes asfálticos para tráfego muito pesado**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2017.

ANUPAM, K; SRIRANGAM, S.K.; SCARPAS, A.; KASBERGEN, C. Influence of temperature on tire-pavement friction: analyses. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2369, p.114-124. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15619**: Misturas Asfálticas – Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. Rio de Janeiro, RJ. 2016.

_____. **NBR 11341**: Derivados de petróleo – Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. Rio de Janeiro, RJ. 2014.

_____. **NBR 15086**: Materiais Betuminosos – Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro. Rio de Janeiro, RJ. 2006.

_____. **NBR 15184:** Materiais Betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas utilizando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, RJ. 2005.

_____. **NBR 6560:** Ligantes Asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola. Rio de Janeiro, RJ. 2016.

_____. **NBR 6576:** Materiais asfálticos – Determinação da penetração. Rio de Janeiro, RJ. 2007.

_____. **NBR 6296:** Produtos betuminosos semissólidos – Determinação da massa específica e densidade relativa. Rio de Janeiro, RJ. 2013.

AWED, A; KASSEM, E.; MASAD, E; LITTLE, D. **Method for predicting the Laboratory compaction behavior of asphalt mixtures.** American Society of Civil Engineers - ASCE. 2015 DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001244.

BAHIA, H.U.; FAHEEM, A.F. **Using the superpave gyratory compactor to estimate rutting resistance of hot-mix asphalt.** Transportation Research Circular EC124, Practical approaches to hot-mix asphalt mix design and production quality control testing, pp.45-61, Washington, D.C., EUA. 2007.

BAHIA, H. U.; COENEN, A.; TABATABAEE, N. **Mix Design and Compaction.** 2013. Netherlands: Springer.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica:** materiais, projeto e restauração. Oficina de Textos, São Paulo, 2007.

BARROS, L.M.; BRITO, L.; CERATTI, J. Desempenho quanto à deformação permanente de misturas asfálticas com diferentes ligantes. **XVIII Congresso Ibero Latinoamericano del Asfalto.** Bariloche, Argentina. 2015.

BASTOS, J. B. S. **Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico.** 2016. 200f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2016.

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica:** formação básica para engenheiros. ABEDA, Petrobrás. Rio de Janeiro, 2010.

BESSA, I.S.; **Laboratory and field study of fatigue cracking prediction in asphalt pavements.** Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2017.

BHASIN, A.; BUTTON, J.W.; CHOWDHURY, A.; MASAD, E. Selection of optimum gravel aggregate size to resist permanent deformation in hot-mix asphalt. **Transportation Research Record:** Journal of the Transportation Research Board, v. 1952, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2006, pp. 39–47.

BONAQUIST, R. **Evaluation of Flow Number (FN) as a discriminating HMA mixture property**. Projeto Número 0092-09-01. Wisconsin: Wisconsin Highway Research Program, 2012.

BRITO, L.A.T. **Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2006

BROWN, S.F.; PELL, P.S. **Repeated Loading of Bituminous Materials**, CAPSA 74, National Institute for Road Research, Republic of South Africa, Durban. 1974.

BUTTON, J.W.; PERDOMO, D.; LYTTON, R.L. Influence of aggregate on rutting in asphalt concrete pavements. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v.1259. 2002.

CAMARGO, F.F. **Field and laboratory performance evaluation of a field-blended rubber asphalt**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2016.

CARVALHO, F.S. **Análise da textura superficial de pavimentos asfálticos e sua influência na ocorrência de acidentes de tráfego rodoviário em condição de pista molhada**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2019.

CEZARO JUNIOR, T. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas convencionais e modificadas**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2008.

COLERI, E.; RONGZONG, W.; SIGNORE, J.M.; HARVEY, J.T. Rutting of rubberized gap-graded and polymer-modified dense-graded asphalt overlays in composite pavements. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2304, p. 195–204. Washington, D.C. 2012. DOI: 10.3141/2304-22

COOPER, K.E.; BROWN, S.F.; POOLEY, GR. **The design of aggregate gradings for asphalt basecourse**. Proc. Of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol 54 (1985), pp324-346.1985.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **DNER-ME 035/98**. Agregados – Determinação de Abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, RJ. 1998.

_____. **DNER-ME 035/98**: Equivalente de Areia. Rio de Janeiro, RJ. 1998.
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 008/2003**: Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Rio de Janeiro, RJ. 2003.

_____. **DNIT 031/2006-ES**: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico. Rio de Janeiro, RJ. 2006.

_____. **DNIT 112/2009-ES**: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending”. Rio de Janeiro, RJ. 2009.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, RJ, 2006.

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

DNIT 135/2018-ME – Pavimentação Asfáltica – Misturas asfálticas: Determinação do módulo de resiliência – Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 13p. 2018.

EPPS, A.L.; HAND, A.J. Coarse Superpave Mixture Sensitivity. **Transportation Research Record**: Journal of the Transportation Research Board, v. 1712. Paper no. 00-1269. 2000.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 12697-33**: Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 33: Specimen prepared by roller compactor. 2003.

_____. **EN 12697-22**: Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 22: Wheel Tracking. 2008.

FACCIN, C. **Concreto asfálticos em utilização no Rio Grande do Sul**: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2018.

FEHRL. SILVIA - **Guidance Manual for the Implementation of low-noise road surfaces**. FEHRL. Belgica, Bruxelas: 2006. 318p.

FERREIRA, P.N. **Avaliação da macrotextura de trechos pavimentados de rodovias estaduais situadas na região insular do município de Florianópolis**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2002.

FERREIRA, J.L.S.; BABADOPULOS, L.F.A.L; BASTOS, J.B.S; SOARES, J.B. **A tool to design rutting resistant asphalt mixes through aggregate gradation selection**. Construction and Building Materials. 2020.

FLETCHER, T.; CHANDAN, C.; MASAD, E.; SIVAKUMAR, K. Measurement of aggregate texture and its influence on hot mix asphalt (HMA) permanent deformation. **Journal of testing and evaluation**, vol30, no6. 2017.

FLINTSCH, G. W.; MCGHEE, K. K.; IZEPPI, E. L.; NAJAFI, S. **The little book of tire pavement friction**. Pavement Surface Properties Consortium, 23p. 2012.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos** – SisPav. 2007. 294 f. Tese (Doutorado em Engenharia

Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FRITZEN, M.A. **Avaliação de soluções de reforço de pavimentos asfálticos com simulador de tráfego da rodovia Rio-Teresópolis**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, RJ. 2005.

GEORGIU, P.; LOIZOS, A. A laboratory compaction approach to characterize asphalt pavement surface friction performance. **Wear**, v. 311, p 114-122. 2014.

GIBSON, N; LI, S.X.; KUTAY, M.E. Rutting resistance of laboratory-prepared and field-compacted asphalt mixtures. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2181. pp. 109–116. Washington, D.C. 2010. DOI: 10.3141/2181-12

GOLALIPOUR, A.; JAMSHIDI, E.; NIAZI, Y.; AFSHARIKIA, Z.; KHADEM, M. Effect of aggregate gradation on rutting of asphalt pavements. **5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures**. 2012.

GOPALAKRISHNAN, K., CEYLAN, H., INANC, F., AND HEITZMAN, M. **Characterization of Asphalt Materials using X-ray High-Resolution Computed Tomography Imaging Techniques**. Proceedings of 2006 T&DI Airfield and Highway Pavement Specialty Conference, pp. 437-454, Atlanta, Georgia, April 30–May 3, 2006

GOUVEIA, L. T. **Contribuições ao estudo da influência de propriedades de agregados no comportamento de misturas asfálticas densas**. 2006. 340f. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2006.

GREENE, J.; CHUN, S.; CHOUBANE, B. **Enhanced gradation guidelines to improve asphalt mixture performance**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2456. DOI: 10.3141/2456-01. Washington, D.C., 2014.

HADDOCK, J.; PAN, C.; FENG, A.; WHITE, T.D. Effect of gradation on asphalt mixture performance. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1681. Paper no. 99-1336. 2008

HAFAEEZ, I; JUNIAD, F; KAMAL, M.A.; HUSSAIN, J. **Influence of single- and two-stage aggregate manufacturing mechanisms on asphalt mixture performance**. ASCE – American Society of Civil Engineers. 2015.

HALL, J. W.; SMITH, K. L.; TITUS-GLOVER, L.; WAMBOLD, J. C.; YAGER, T. J.; RADO, Z. **Guide for pavement friction**. National Cooperative Highway Research Program – NCHRP Web-Only Document 108, Final Report for NCHRP Project 01-43, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, USA, 2009, 257p.

HAND, A.J.; EPPS, A.L. Impact of gradation relative to superpave restricted zone on hot-mix asphalt pavement performance. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1767. Paper no. 01-0141. 2001

HAND, A.J.; STIADY, J.L.; WHITE, T.D.; NOURELDIN, A.S.; GALAL, K. Gradation Effects on hot-mix asphalt performance. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1767. paper no. 01-0140. 2001.

HARVEY, J.; POPESCU, L. Accelerated pavement tesiting rutting performance of two caltrans overlay strategies. **Annual Meeting of the Transportation Research Board of the National Academies**. Washington, DC. 2000.

HARVEY, J.T.; TSAI, B-W. Effects of asphalt content and air void content on mix fatigue and stiffness. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1543. 1996.

HENRY, J. J. Evaluation of pavement friction characteristics, a synthesis of highway practice. **Annual Meeting of the Transportation Research Board of the National Academies**. Washington, DC. 2000.

HUANG, B; CHEN, X.; SHU, X.; MASAD, E.; MAHMOUD, E. Effects of coarse aggregate angularity and asphalt binder on laboratory-measured permanent deformation properties of HMA. **International Journal of Pavement Engineering**, vol10, no 1. 2009.

HUBER G. NCHRP Synthesis of Highway Practice 284: Performance Survey on Open-Graded Friction Course Mixes. **Annual Meeting of the Transportation Research Board of the National Academies**. Washington, D.C. 2000.

HUNTER, A.E.; AIREY, G.D.; COLLOP, A.C. Effect of asphalt mixture compaction on aggregate orientation and mechanical performance. Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04). Sun City, South Africa. 2004.

KALOUSH, K.E.; WITCZAK, M.W.; SOTIL, A.C.; WAY, G.B. Laboratory evaluation of asphalt rubber mixtures using de the dynamic modulus (E^*) test. **Annual Meeting of the Transportation Research Board of the National Academies**. 2003.

KANDHAL, P.S.; MALLICK, R.B. Effect of mix gradation on rutting potential of dense-graded asphalt mixtures. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1767. Paper no. 01-2051. 2001.

KANDHAL, P.S.; MALLICK, R.B. Open-graded friction course: state of the practice. **Annual Meeting of the Transportation Research Board of the National Academies**. 1998.

KASSEM, E.; WALUBITA, L.; SCULLION, T.; MASAD, E.; WIMSATT, A. Evaluation of full-depth asphalt pavement construction using x-ray computed tomography and ground penetrating radar. **Journal of performance of constructed facilities - ASCE**. 2008.

KASSEM, E.; AWED, A.; MASAD, E. Effect of compaction on skid resistance of asphalt pavements. **4th Chinese-European Workshop on Functional Pavement Design**. Delft, Netherlands. 2016.

KENNEDY, T.W.; HUBER, G.A.; HARRIGAN, E.T.; COMINSKI, R.J.; HUGHES, C.S.; QUINTUS, H.V.; MOULTHROP, J.S. (1994). The superpave mix design manual for new construction and overlays. **Report n. SHRP-A-410**. Strategic Highway Research Program. National Research Council 2101. Washington DC, 1994.

KHEDAYWI, T.S.; TONS, E. Aggregate rugosity and size effect on bituminous mixes. **Transportation Research Record**: Journal of the Transportation Research Board, v. 1619. paper no. 98-0357. 1998.

KHEDAYWI, T.S.; WHITE, T.D. Effect of segregation on fatigue performance of asphalt paving mixtures. **Transportation Research Record**: Journal of the Transportation Research Board, v. 1543. 1996.

KIM, S. **Identification and assessment of the dominant aggregate size range of asphalt mixture**. Dissertation. University of Florida. 2006.

KUCHIISHI, A.K. **Mechanical behavior of cold recycled asphalt mixtures**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2019.

LEANDRO, R. P. **Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de compactação**. 2016. 287f. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2016.

LEANDRO, R.P.; VASCONCELOS, K.L.; BERNUCCI, L.L.B. Evaluation of the laboratory compaction method on the air voids and the mechanical behavior of hot mix asphalt. **Construction and Building Materials**. 2017.

LINDEN, F.; J. VAN DER HEIDE. **Some Aspects of the Compaction of Asphalt Mixes and its Influence on Mix Properties**, Proceedings. Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 56, 408-426. 1987.

LU, Q.; HARVEY, J.T. Laboratory evaluation of open-graded asphalt mixes with small aggregates and various binders and additives. **Transportation Research Record**: Journal of the Transportation Research Board, v. 2209, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2011, p. 61–69. DOI: 10.3141/2209-08

MAHBOUB, K.; LITTLE, D.N. **Improved Asphalt Concrete mixture design procedure**. Final Report FHWA/TX-87/474-1F. 1988.

MASAD, E.; MUHUNTHAN, B.; SHASHIDHAR, N.; HARMAN, T. quantifying laboratory compaction effects on the internal structure of asphalt concrete.

Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 1681. paper no 99-1052. 1998.

MASCARENHAS, Z.M.G. **Large stone asphalt mixture as a rehabilitation strategy for heavy traffic highways.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2018.

MERCADO, E.A. **Influence of fundamental material properties and air void structure on moisture damage of asphalt mixes.** Dissertation. Texas A&M University. College station, TX, United States. 2007.

MONISMITH, C.L.; EPPS, J.A.; FINN, F.N. **Improved Asphalt Mix Design,** Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 54, 347-406. 1985.

MONTOYA, M.A.; POURANIAN, M.R.; HADDOCK, J.E. **Increasing asphalt pavement density:** a field project. 2018 DRAFT Annual Meeting Program. Jacksonville, Florida. 2018.

MOURA, E. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório.** 299f. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2010.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente.** 2008. 204f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

NASCIMENTO, F.A.C.; GUIMARÃES, A.C.R.; CARNEIRO, L.A.V. Análise da influência das propriedades do ligante asfáltico e do esqueleto pétreo na deformação permanente das misturas asfálticas. **44a Reunião Anual de Pavimentação.** ISSN 1807-5568RAPv. Foz do Iguaçu, PR. 2015.

NATIONAL CENTER FOR ASPHALT TECHNOLOGY (NCAT) **Using lab data to predict the field compactability.** HotMix Asphalt Technol., 16(1), 57–58. 2011.

ONOFRE, F. C. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos modificados por ácido polifosfórico e aditivos poliméricos, enfatizando a resistência à deformação permanente.** 2012. 161f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2012.

PALIT, S.K.; REDDY, S.; PANDEY, B.B. Laboratory evaluation of crumb rubber modified asphalt mixes. **Journal of Materials in Civil Engineering** - ASCE. 2004.

PAZOS, A. G. **Efeito de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas.** 129f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2015.

PELLINEN, T. K.; WITCZAK, M. W.; BONAQUIST, R. F. **Asphalt mix master curve construction using sigmoidal fitting function with non-linear least squares**

optimization. Proceedings of Pavement Mechanics, Symposium at 15th ASCE Engineering Mechanics Conference (EM2000), New York: Columbia University, 2004.

PEREIRA, P.A.A.; PAIS, J.C.; TRICHÊS, G.; FONTES, L.P.T.L. Skid resistance and texture of compacted asphalt mixes evaluated from the IFI in laboratory preparation. 4th Eurasphalt and Eurobitume Congress, 2008, Copenhagen. **4th Eurasphalt and Eurobitume Congress.** Copenhagen, 2008. v. 1. p. 1-14.

PEREIRA, C. A.; SOARES, J. B.; PONTES FILHO, I. D. DA S.; BRANCO, V. T. F. C. Análise da aderência pneu-pavimento em pontos de ocorrência de acidentes. **TRANSPORTES**, v. 20, n. 2 p. 65–74. 2012.

PETERSON, R.L.; MAHBOUB, K.C.; ANDERSON, R.M.; MASAD, E.; TASHAMN, L. Superpave Laboratory Compaction Versus Field Compaction. **Transportation Research Record**: Journal of the Transportation Research Board, v. 1832. paper no. 03-3117. 2003.

POHRT, R. **Tire wear particle hot spots** – review of influencing factors. Mechanical Engineering Vol. 17, No 1, 2019, pp. 17 – 27.

RADZI, H.M.; MUNIANDY, T.; HASSIM, S.; LAW, T.H.; JAKARNI, F.M. An overview of asphalt mix designs using various compactors. 10th Malaysian Road Conference and Exhibition. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 512 (2019) 012031.

ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; LEE, D-Y; KENNEDY, T.W. **Hot Mix Asphalt Materials**, Mixture Design, and Construction. NAPA Research and Education Foundation. Lanham, Maryland. 1996.

SANDBERG, U. **Influence of road surface texture on traffic characteristics related to environment, economy and safety**: A state-of-the-art study regarding measures and measuring methods. Swedish National Road Administration. Estocolmo: 1997. 112 p.

SANTOS, C.R.G. **Avaliação das influências do tipo de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2005.

SEEBALY, P.E.; RIDOLFI, D.; GANGARAVAM, R.S.; EPPS, J.A. Selecting most desirable hot-mix asphalt mixtures. **Transportation Research Record**: Journal of the Transportation Research Board, v. 1590. paper no. 970665. 1997.

SOUSA, J. B.; CRAUS, J.; MONISMITH, C. L. Summary report on permanent deformation in asphalt concrete. **SHRP-A/IR-91-104**. Washington: Strategic Highway Research Program, 1991.

SOUSA, J.B. PAIS, J.C.; PRATES, M.; BARROS, R.; LANGLOIS, P.; LECLERC, A-M. **Transportation Research Record**: Journal of the Transportation Research Board, v. 1630. Paper no. 98-0897. 1998

STIADY, J.; HAND, A.; WHITE, T. **Quantifying contributions of aggregate characteristics do HMA performance using PURWheel laboratory tracking device**. Aggregate Contribution to Hot Mix Asphalt (HMA) Performance, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2001.

TANGELLA, S.C.S.R.; CRAUS, J.; DEACON, J.A.; MONISMITH, C.L. **Summary report on fatigue response of asphalt mixtures**. Strategic Highway Research Program Project A-003-A. 1990.

UGE, P.; P.J. VAN DE LOO. **Permanent Deformation of Asphalt Mixes**, hell-Laboratorium, Amsterdam, November 1974.

VAIANA, R.; PRATICÒ, F.G.; IUELE, T.; GALLELLI, V.; MINANI, V. **Effect of asphalt mix properties on surface texture**: an experimental study. Applied Mechanics and Materials, v. 368-370 p. 1056-1060 Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.368-370. 2013.

VAVRIK, W. R. **Asphalt misture design concepts to develop aggregate interlock**. Dissertation (Doctor of Philosophy). University of Illinois, 2000.

VIEIRA, T. **Asphaltic pavement surface analysis and its effects on the tyre-pavement friction performance**. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014, 168p.

WAMBOLD, J. C., ANTLE, C. E. J., HENRY, J., RADO, Z. **International experiment to compare and harmonize skid resistance and texture measurements**. PIARC report, 1995.

YODER, E.J.; WITCZAK, M.W. **Principles of pavement design**. Ed: John and Wiley Sons. 2nd Edition. United States. 1975.

ZEIADA, W.A.; KALOUSH, K.E.; UNDERWOOD, B.S.; MAMLOUK, M.S. **Effect of air voids and asphalt content on fatigue damage using the viscoelastic continuum damage analysis**. Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements-ASCE. 2013.

APÊNDICE A – RESULTADOS DE LEVANTAMENTOS DEFLECTOMÉTRICOS

Resultados de levantamentos deflectométricos são apresentados por período de levantamento e por tipo de mistura.

Figura 80 – Bacias de deflexão para o tempo 0 (junho/2018) da mistura CA+

Figura 81 – Bacias de deflexão para o tempo 0 (junho/2018) da mistura CA-

Figura 82 – Bacias de deflexão para o tempo 0 (junho/2018) da mistura CPA

Figura 83 – Bacias de deflexão para o tempo 0 (junho/2018) da mistura SD+

Figura 84 – Bacias de deflexão para o tempo 0 (junho/2018) da mistura SD-

Figura 85 – Bacias de deflexão para o tempo 0 (junho/2018) da mistura GAP

Figura 86 – Bacias de deflexão para o tempo 6 (dezembro/2018) da mistura CA+

Figura 87 – Bacias de deflexão para o tempo 6 (dezembro/2018) da mistura CA-

Figura 88 – Bacias de deflexão para o tempo 6 (dezembro/2018) da mistura CPA

Figura 89 – Bacias de deflexão para o tempo 6 (dezembro/2018) da mistura SD+

Figura 90 – Bacias de deflexão para o tempo 6 (dezembro/2018) da mistura SD-

Figura 91 – Bacias de deflexão para o tempo 6 (dezembro/2018) da mistura GAP

Figura 92 – Bacias de deflexão para o tempo 12 (junho/2019) da mistura CA+

Figura 93 – Bacias de deflexão para o tempo 12 (junho/2019) da mistura CA-

Figura 94 – Bacias de deflexão para o tempo 12 (junho/2019) da mistura CPA

Figura 95 – Bacias de deflexão para o tempo 12 (junho/2019) da mistura SD+

Figura 96 – Bacias de deflexão para o tempo 12 (junho/2019) da mistura SD-

Figura 97 – Bacias de deflexão para o tempo 12 (junho/2019) da mistura GAP