



COMPORTAMENTO MECÂNICO DE DUAS MISTURAS ASFÁLTICAS COM O USO DE UM ADITIVO SURFACTANTE DE MISTURA MORNA

Cristiano Schmidt Della Flôra

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Laura Maria Goretti da Motta

Rio de Janeiro
Junho de 2018

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE DUAS MISTURAS ASFÁLTICAS COM O
USO DE UM ADITIVO SURFACTANTE DE MISTURA MORNA

Cristiano Schmidt Della Flôra

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof.^a Laura Maria Goretti da Motta, D.Sc

Dr. Luis Alberto Herrmann do Nascimento, Ph.D.

Prof.^a Rosângela dos Santos Motta, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2018

Della Flôra, Cristiano Schmidt

Comportamento Mecânico de Duas Misturas Asfálticas com o Uso de Um Aditivo Surfactante de Mistura Morna/
Cristiano Schmidt Della Flôra. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XVII, 129 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Laura Maria Goretti da Motta

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 118-129.

1. Mistura morna. 2. Ligantes modificados. 3. Comportamento mecânico. I. Motta, Laura Maria Goretti da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Santo e Liane, pelo amor,
compreensão, incentivo e exemplo de vida

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Santo e Liane, por serem meu porto seguro, meus maiores motivadores, por terem me dado todo o suporte e amor necessário, pela compreensão, pela educação e pela pessoa que me tornei. Ao meu irmão, Gaspar, pela amizade, compreensão e companheirismo. Meu amor por vocês é incondicional;

A minha orientadora, Prof.^a Dra. Laura Maria Goretti da Motta, pelo indiscutível exemplo profissional e pessoa. Agradeço imensamente por ter me aceitado como seu orientado. Exemplo de humildade, competência, simplicidade e dedicação à engenharia;

A todas as pessoas que fazem parte do Laboratório de Pavimentos da COPPE: Allan, Álvaro, Carlos, Filipe, Leandro, Leni, Marcos, Mariluce, Roberto, Thiago, Vera e Washington.

Ao CENPES/Petrobras, em especial ao Eng. Luis Alberto Herrmann Nascimento, por todo o auxílio e ensinamentos ao longo do mestrado, e aos técnicos Sérgio Murilo Nunes Rocha e Ulisses Santos Figueiredo, pelo apoio e realização de alguns ensaios;

A Stratura Asfaltos, pelo ligante modificado utilizado na pesquisa, em especial ao Eng. Fábio Otaviano e Eng. Ricardo Teixeira, e aos técnicos José Romildo e Marcelo Medeiros, pelo apoio e realização de alguns ensaios;

A Concessionária Rio Teresópolis, pelos agregados e ligante convencional utilizados na pesquisa;

A *AkzoNobel Asphalt Applications*, em especial ao Eng. Ângelo Giovani Ribeiro de Almeida, pelo aditivo de mistura morna utilizado na pesquisa;

Ao CNPq pela bolsa de estudos;

Aos professores da Geotecnia da COPPE pelo convívio ao longo do curso, incentivo e ensinamentos;

Aos colegas e amigos da Pavimentação COPPE/UFRJ: Alex, Ana, André, Carine, Caroline, Fernando, Flávia, Gustavo, Jordana, José, Larissa, Lorena, Patrícia, Pedro, Ricardo e Thaísa.

Aos amigos e colegas de apartamento Ana, André, Mônica, Pedro e Ricardo, pelo convívio ao longo do mestrado. Em especial ao Pedro e ao Ricardo, com os quais convivi mais tempo e compartilhei os dois anos de mestrado.

Por fim gostaria de agradecer a todos os meus amigos criados durante o mestrado, MUITO OBRIGADO!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE DUAS MISTURAS ASFÁLTICAS COM O USO DE UM ADITIVO SURFACTANTE DE MISTURA MORNA

Cristiano Schmidt Della Flora

Junho/2018

Orientadora: Laura Maria Goretti da Motta

Programa: Engenharia Civil

A preocupação com o meio ambiente no setor rodoviário é crescente. Assim, o uso de misturas mornas, que proporcionam economia de energia e redução de gases poluentes, se torna desejável. Esta pesquisa comparou duas misturas asfálticas, quentes e mornas, sob o ponto de vista mecânico e de impacto no dimensionamento. Uma mistura morna é menos agressiva ao meio ambiente em relação à mistura quente, mas são várias as técnicas e produtos que permitem diminuição das temperaturas de mistura e de compactação. Foi analisada a viabilidade do emprego de um aditivo surfactante de mistura morna pelo seu comportamento mecânico nas misturas asfálticas. Foram estudadas quatro misturas asfálticas, duas a quente, uma com um ligante convencional e outra com um modificado, e duas mornas, com os mesmos ligantes combinados a um aditivo surfactante. As misturas foram com agregados de mesma origem, mesma curva granulométrica e mesmo teor de ligante. As análises foram dos ensaios de: resistência à tração, módulo de resiliência, *flow number* e fadiga por compressão diametral. Também se considerou o dano por umidade induzida e os índices das curvas de densificação do compactador giratório: CDI e TDI. Fez-se uma análise estrutural da vida de fadiga com o auxílio do *software* MeDiNa. As misturas mornas apresentaram comportamento satisfatório, comparável às misturas a quente. Porém, para algumas estruturas simuladas, exigiriam espessuras maiores, sendo mais notáveis as diferenças quando se comparam as misturas com o ligante modificado devido a que suas curvas de fadiga ficaram muito sensíveis à deformação inicial em relação ao ligante convencional.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MECHANICAL BEHAVIOR OF TWO ASPHALTIC MIXTURES WITH THE USE OF A WARM MIX ASPHALT SURFACTANT ADDITIVE

Cristiano Schmidt Della Flora

June/2018

Advisor: Laura Maria Goretti da Motta

Department: Civil Engineering

The concern about the environment in the road sector is growing. Thus, the use of warm mixtures, which provide energy savings and reduction of polluting gases, becomes desirable. This research compared two asphalt mixtures, both hot and warm, from the mechanical point of view and impact on the design. A warm mix asphalt is less aggressive to the environment than the hot mix, but there are several techniques and products that allow for lowering the mixing and compaction temperatures. The feasibility of the use of a warm the asphalt mix surfactant additive was analyzed by its mechanical behavior. Four asphalt mixtures were studied, two hot mix asphalts, one with a conventional binder and one with a modified binder, and two warm mix asphalts, with the same binders combined with a surfactant additive. The mixtures were with aggregates of the same origin, in the same particle size and of the same binder content. The performed tests were: indirect tensile strength, resilience modulus, flow number and diametrical compression fatigue. Induced moisture damage and indices of the densification curves of the gyratory compactor: CDI and TDI were also considered. A structural analysis of the fatigue life was done with the aid of MeDiNa software. The warm mix exhibited satisfactory performance, comparable to hot mix. However, for some simulated structures, they would require larger thicknesses, the differences being more remarkable when comparing the mixtures with the modified binder because their fatigue curves became very sensitive to the initial deformation over the conventional binder.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS.....	7
2.1	VANTAGENS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS	7
2.2	TIPOS DE TECNOLOGIA WMA	10
2.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA REDISENTO WMX.....	13
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
3.1	AGREGADOS E CURVA GRANULOMÉTRICA.....	17
3.1.1	Granulometria dos agregados e da mistura	17
3.1.2	Caracterização do agregado	19
3.1.3	AIMS 2: Forma, angularidade e textura	21
3.1.4	Análise do esqueleto pétreo pelo Método Bailey	27
3.2	LIGANTES ASFÁLTICOS E ADITIVO DE MISTURA MORNA	31
3.2.1	Aditivo de mistura morna.....	32
3.2.2	Caracterização dos ligantes asfálticos puros e modificados	33
3.3	DOSAGEM DE MISTURAS	44
3.3.1	Parâmetros volumétricos das misturas estudadas.....	50
3.3.2	Avaliação das misturas WMA	51
3.4	ÍNDICES DE COMPACTAÇÃO GIRATÓRIA.....	55
3.4.1	<i>Compaction Density Index (CDI)</i>	56
3.4.2	<i>Traffic Density Index (TDI)</i>	56
3.4.3	Processamento das curvas de densificação e cálculo do CDI e TDI ..	57
3.4.4	Parâmetros de dosagem	61
3.4.5	Procedimento adotado.....	64
3.5	MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIOS MECÂNICOS 65	
3.6	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS	67
3.6.1	Dano por umidade induzida	67
3.6.2	Módulo de Resiliência (MR)	69

3.6.3	Resistência a tração indireta (RT)	71
3.6.4	<i>Flow Number</i> (FN)	72
3.6.5	Fadiga (Tração indireta por compressão diametral)	75
3.7	ANÁLISE ESTRUTURAL	77
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	81
4.1	ANÁLISE DO ESQUELETO PÉTREO PELO MÉTODO BAILEY	81
4.2	ÍNDICES DE COMPACTAÇÃO GIRATÓRIA	84
4.3	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS	91
4.3.1	Dano por umidade induzida	91
4.3.2	Módulo de Resiliência	93
4.3.3	Resistência a tração indireta (RT)	94
4.3.4	<i>Flow Number</i> (FN)	96
4.3.5	Fadiga (Tração indireta por compressão diametral)	103
4.4	ANÁLISE ESTRUTURAL	105
4.4.1	Estrutura 1	106
4.4.2	Estrutura 2	108
4.4.3	Discussões dos resultados da análise estrutural	110
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	113
5.1	CONCLUSÕES	113
5.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Interação do Rediset com agregado silicoso (AKZONOBEL, 2011).....	4
Figura 2: Curva granulométrica final da mistura de agregados desta pesquisa.....	19
Figura 3: Curva granulométrica final da mistura de agregados desta pesquisa indicada na potência 0,45.....	19
Figura 4: Equipamento AIMS 2	22
Figura 5: Forma e tamanho do aditivo Rediset WMX	33
Figura 6: Agitador utilizado para a incorporação do aditivo Rediset WMX.....	34
Figura 7: Amostras utilizadas nos ensaios de estabilidade de estocagem nesta pesquisa	35
Figura 8: Curvas de viscosidade dos ligantes desta pesquisa.....	35
Figura 9: Parâmetros obtidos na dosagem da mistura HMA1 desta pesquisa.....	50
Figura 10: Recobrimento dos agregados graúdos da WMA2 desta pesquisa.....	53
Figura 11: Curva de densificação típica de uma mistura asfáltica no compactador giratório	59
Figura 12: Esquema do método de retangularização para o cálculo de CDI e TDI (NASCIMENTO, 2008)	60
Figura 13: Ilustração esquemática do uso do CDI como parâmetro de dosagem (NASCIMENTO, 2008)	63
Figura 14: Etapas do ensaio de dano por umidade induzida feito nesta pesquisa.....	68
Figura 15: Equipamento do Laboratório de Pavimentação da COPPE utilizado no ensaio de módulo de resiliência nesta pesquisa.....	69
Figura 16: Equipamento do Laboratório de Pavimentação da COPPE utilizado no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	71
Figura 17: Curva típica do ensaio uniaxial de carga repetida de misturas asfálticas (DNIT /2017 – ME).....	73
Figura 18: Equipamento do Laboratório de Pavimentação da COPPE utilizado no ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente (FN)	73
Figura 19: Equipamento do Laboratório de Pavimentação da COPPE utilizado no ensaio de fadiga	76
Figura 20: Tela inicial do <i>Software</i> MeDiNa 2018 v.1.0.0	77

Figura 21: Sistema de coordenadas ajustadas para o Eixo Padrão Rodoviário (DNIT, 2018).....	80
Figura 22: Comparação do CDI e CDIr das misturas desta pesquisa.....	85
Figura 23: Comparação do TDI e TDIr das misturas desta pesquisa	85
Figura 24: Resultado de CDI das misturas desta pesquisa	88
Figura 25: Resultado de TDI das misturas desta pesquisa	90
Figura 26: Resultado da resistência retida à tração (RRT) das misturas desta pesquisa	92
Figura 27: Resultado de MR das misturas asfálticas desta pesquisa.....	94
Figura 28: Resultados de RT das misturas asfálticas desta pesquisa	95
Figura 29: Resultados de <i>Flow Number</i> (FN) das misturas asfálticas desta pesquisa....	97
Figura 30: Correlação dos resultados de FN das misturas asfálticas com resultados de PA e MSCR dos ligantes desta pesquisa	98
Figura 31: Comparativo entre CDI/TDI e FN das misturas asfálticas desta pesquisa .	100
Figura 32: Comparativo do CDI e FN desta pesquisa e de CAVALCANTI (2010)....	102
Figura 33: Curvas de fadiga das misturas (Diferença de tensões <i>versus</i> vida de fadiga)	103
Figura 34: Curvas de fadiga das misturas (Deformação específica resiliente <i>versus</i> vida de fadiga).....	104
Figura 35: Curvas de fadiga extrapoladas das misturas desta pesquisa (Deformação específica resiliente <i>versus</i> vida de fadiga)	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distribuição granulométrica dos agregados e da composição utilizada para misturas asfálticas desta pesquisa.....	18
Tabela 2: Resultados dos ensaios de densidade e absorção dos agregados usados nesta pesquisa	20
Tabela 3: Resultados dos ensaios de abrasão Los Angeles dos agregados desta pesquisa	21
Tabela 4: Resultado dos ensaios de equivalente de areia	21
Tabela 5: Quantidades mínimas de partículas para ensaios no sistema AIMS 2 (PINE INSTRUMENT COMPANY, 2011)	23
Tabela 6: Classificação das características fornecidas pelo AIMS 2 (Adaptado de PINE INSTRUMENT COMPANY, 2011)	24
Tabela 7: Resultados para a análise dos agregados deste estudo no AIMS 2	25
Tabela 8: Limites da classificação proposta para agregados brasileiros (IBIAPINA <i>et al.</i> , 2018).....	26
Tabela 9: Classificação das frações de agregado desta pesquisa de acordo com IBIAPINA <i>et al.</i> (2018)	27
Tabela 10: Peneiras de Controle para diversas Misturas Asfálticas pelo Método Bailey (VAVRIK <i>et al.</i> , 2002a)	28
Tabela 11: Peneiras de Controle para Mistura de Granulometria Fina pelo Método Bailey (VAVRIK <i>et al.</i> , 2002a)	29
Tabela 12: Valores recomendados para os parâmetros de proporção dos agregados em misturas de comportamento graúdo (VAVRIK <i>et al.</i> , 2002a).....	31
Tabela 13: Valores recomendados para os parâmetros de proporção dos agregados em misturas de comportamento fino (VAVRIK <i>et al.</i> , 2002a)	31
Tabela 14: Classificação de Comportamento de Misturas (AASHTO M 323-13)	31
Tabela 15: Características físicas do aditivo de mistura morna usado na pesquisa	32
Tabela 16: Dosagem do aditivo de mistura morna recomendada pelo fabricante.....	32
Tabela 17: Parâmetros usados na incorporação do aditivo WMA nesta pesquisa	34
Tabela 18: Caracterização dos ligantes desta pesquisa sem envelhecimento de curto prazo	36
Tabela 19: Caracterização dos ligantes desta pesquisa com envelhecimento de curto prazo	36

Tabela 20: Classificação PG do CAP 30/45 desta pesquisa.....	39
Tabela 21: Classificação PG do CAP 30/45 + 2% de aditivo WMA desta pesquisa	40
Tabela 22: Classificação PG do AMP 60/85 desta pesquisa	41
Tabela 23: Classificação PG do AMP 60/85 + 2% de aditivo WMA desta pesquisa	42
Tabela 24: Resumo das características das misturas asfálticas desta pesquisa	44
Tabela 25: Temperaturas dos agregados, usinagem e de compactação das misturas desta pesquisa	45
Tabela 26: Critérios de compactação usando o compactador giratório <i>Superpave</i> (DNIT 178/2018 – PRO).....	47
Tabela 27: Requisitos de dosagem AASHTO M 323-13	49
Tabela 28: Dados de características e parâmetros das misturas desta pesquisa	50
Tabela 29: Critérios de dosagem de misturas asfálticas propostos por BAHIA e FAHEEM (2007)	61
Tabela 30: Critérios de deformação permanente de misturas asfálticas pelo ensaio FN (DNIT, 2018).....	74
Tabela 31: Espessura mínima de revestimento betuminoso (adaptado de DNIT, 2006) 80	
Tabela 32: Análise do esqueleto pétreo da mistura de agregados desta pesquisa pelo Método Bailey	81
Tabela 33: Comparação do CDI e CDIr das misturas desta pesquisa	84
Tabela 34: Comparação do TDI e TDIr das misturas desta pesquisa.....	85
Tabela 35: Resultado de CDI das misturas desta pesquisa.....	87
Tabela 36: Resultado de TDI das misturas desta pesquisa.....	89
Tabela 37: Resultados do ensaio de dano por umidade induzida das misturas desta pesquisa	91
Tabela 38: Resultado de MR das misturas asfálticas desta pesquisa	94
Tabela 39: Resultados de RT das misturas asfálticas desta pesquisa	94
Tabela 40: Resultados de <i>Flow Number</i> (FN) das misturas asfálticas desta pesquisa ...	97
Tabela 41: Resumo das características de misturas de CAVALCANTI (2010) e 1 desta pesquisa	101
Tabela 42: Parâmetros obtidos das curvas de fadiga desta pesquisa	103
Tabela 43: N de serviço máximo que as misturas deste trabalho atendem em função do FN	105
Tabela 44: Dimensionamento do revestimento da estrutura 1 para N (DNIT) = $1,00 \times 10^6$	106

Tabela 45: Dimensionamento do revestimento da estrutura 1 para $N (DNIT) = 5,00 \times 10^6$	107
Tabela 46: Dimensionamento do revestimento da estrutura 2 para $N (DNIT) = 1,00 \times 10^8$	109
Tabela 47: Dimensionamento do revestimento da estrutura 2 para $N (DNIT) = 2,00 \times 10^8$	110

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG:	Fração Agregado Graúdo
AIMS:	<i>Aggregate Image Measurement System</i>
AMP:	Asfalto Modificado por Polímero
ASTM:	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBR:	Reômetro de Fluência em Viga
CAAT:	<i>Coarse Aggregate Angularity Texture</i>
CAP:	Cimento Asfáltico de Petróleo
CP/CPs:	Corpo de Prova / Corpos de Prova
CRT:	Concessionária Rio-Teresópolis
DNER:	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT:	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR:	Reômetro de Cisalhamento Dinâmico
DOT:	<i>Department of Transportation</i>
ESAL:	Tráfego Equivalente a Carga de Eixo Simples
FAF:	Fração Fina de Agregado Fino
FN:	<i>Flow Number</i> – Número de Fluência
F&E:	<i>Flat & Elongated</i>
GAF:	Fração Graúda de Agregado Fino
G_{ca} :	Densidade específica aparente dos agregados graúdos
G_{mb} :	Densidade específica aparente da mistura asfáltica
G_{mm} :	Densidade específica máxima da mistura asfáltica

HMA:	<i>Hot Mix Asphalt</i>
IPR:	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
J _{nr} :	Complância não recuperável
J _{nr diff} :	Diferença entre o percentual das complâncias não-recuperáveis
LAS:	<i>Linear Amplitude Sweep</i>
LVDT:	<i>Linear Variable Differential Transducers</i>
MeDiNa:	Método de Dimensionamento Nacional
MR:	Módulos de Resiliência
MSCR:	Fluência e Recuperação sob Tensão Múltipla
NCHRP:	National Cooperative Highway Research Program
PAV:	Vaso de Pressão de Envelhecimento
P _{ca} :	Porcentagem de agregados graúdos na mistura asfáltica
PCP:	Peneira de Controle Primário
PCS:	Peneira de Controle Secundário
PCT:	Peneira de Controle Terciário
PG:	<i>Performance Grade</i>
PM:	Peneira Média
RBV:	Relação Betume-Vazios
RAP:	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RAS:	<i>Reclaimed Asphalt Shingles</i>
RPB:	Relação Pó-Betume Efetivo
RRT:	Resistência Retida à Tração
RT:	Resistência a Tração Indireta

RTFOT:	Estufa de Película Delgada Rotacional
SAMI:	<i>Stress Absorbing Membrane Interlayer</i>
SUPERPAVE:	<i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>
TMN:	Tamanho Máximo Nominal
UFRJ:	Universidade Federal do Rio de Janeiro
WMA:	<i>Warm Mix Asphalt</i>
VAG _{ma} :	Vazios dos Agregados Graúdos na Mistura Asfáltica
VAG _{ss} :	Vazios dos Agregados Graúdos Soltos no Estado Seco
VAM:	Vazios do Agregado Mineral
Va:	Vazios com Ar

1 INTRODUÇÃO

O setor rodoviário tem buscado alternativas ambientalmente corretas visando a redução no consumo de combustíveis e a correspondente redução na emissão de gases causadores do efeito estufa. Dentre estas, destaca-se neste trabalho tecnologias que têm sido desenvolvidas para a produção de misturas asfálticas a temperaturas mais baixas.

Estas tecnologias tiveram suas primeiras discussões no final da década de 1990 e visam o menor consumo de energia de usinagem, melhores condições de trabalho para os operários, maiores lucros e menores danos ambientais, entre outros aspectos de qualidade e durabilidade. Trata-se de produtos e processos modificadores da forma tradicional de produzir e aplicar misturas asfálticas a quente (BUDNY, 2012) denominadas misturas mornas.

A mistura asfáltica morna, do inglês *Warm Mix Asphlt* (WMA), distingue-se de outras misturas asfálticas pelos regimes de temperatura em que são produzidas e pela resistência e durabilidade do produto final. As misturas asfálticas usinadas a frio são fabricadas à temperatura ambiente, na ordem de 20 a 50°C, enquanto as misturas asfálticas quente são tipicamente produzidas na faixa de 140° a 170° C. Misturas mornas são aquelas geralmente produzidas na faixa de temperatura de 105° a 140° C. A mistura asfáltica quente tem maior estabilidade e durabilidade do que misturas asfálticas usinadas a frio, e é por isso que a mistura a frio é usada nas camadas inferiores do revestimento ou em estradas de baixo volume de tráfego. O objetivo da mistura morna é obter, em temperaturas inferiores, um nível de resistência e durabilidade que seja equivalente ou melhor que a mistura a quente (NEWCOMB, 2011).

As misturas mornas acarretam em um ganho de tempo entre a usinagem e a compactação em campo, devido à menor perda de temperatura. Logo, as distâncias de transporte entre a usina e a obra podem ser maiores e ainda assim permitir uma compactação adequada do material. Este tipo de mistura amplia a temporada de pavimentação, visto que possibilita a aplicação em locais de clima frio (PROWELL et al., 2012).

A aplicação de técnicas de misturas asfálticas mornas pode viabilizar a reciclagem de revestimentos asfálticos fresado (RAP, do inglês *Reclaimed Asphalt Pavement*) em maiores taxas de participação na mistura final. A reciclagem de RAP é um ponto chave do ponto de vista econômico e ambiental, permitindo principalmente redução do uso de novos materiais (agregados e ligantes) e a gestão de resíduos sólidos. Isso pode proporcionar ganhos significativos ambientais, dados pelo maior reaproveitamento de materiais recicláveis e diminuição de consumo energético e de emissões (GENNESSEAUX, 2015).

As misturas asfálticas mornas se referem a tecnologias desenvolvidas para diminuir a temperatura das misturas na usinagem e/ou na compactação em campo. Vários estudos têm mostrado que estas temperaturas podem diminuir entre 30°C a 50°C, variando de acordo com o tipo de tecnologia utilizada, trazendo diversos benefícios ao meio ambiente, aos trabalhadores e a vida útil do próprio revestimento asfáltico. Estes benefícios foram constatados por MOTTA (2011) em sua tese de doutorado, onde foram realizados estudos laboratoriais e acompanhamento de dois trechos experimentais, demonstrando pelas propriedades físicas e mecânicas avaliadas em laboratório e em campo, que a qualidade das misturas asfálticas mornas é similar às das usinadas a quente, com os benefícios da redução das emissões de poluentes e da economia de energia.

As tecnologias WMA são comumente agrupadas em tipos, sendo eles: (i) aditivos químicos que melhoram o recobrimento e a adesividade na mistura asfáltica; (ii) aditivos orgânicos (ceras parafínicas) que alteram a viscosidade do asfalto; (iii) processos de espumação com o asfalto aquecido pela inserção de água e/ou aditivos com água em sua composição (RUBIO, 2011; LTP, 2010; ZAUMANIS, 2010; PERKINS, 2009). Algumas tecnologias se enquadram em mais de uma categoria (PROWELL et al., 2012).

No Brasil, a técnica de mistura morna tem sido cada vez mais estudada em trabalhos acadêmicos e, o mais importante, tem sido empregadas em obras de pavimentação, em trechos experimentais, como relatado em FRITZEN *et al.* (2009), MOTTA (2011), ZUBARAN (2014) e MERIGHI (2015). Uso corrente, por exemplo, na concessionária CCR.

Os revestimentos asfálticos são responsáveis por resistir às cargas, impermeabilizar a estrutura do pavimento e, além disto, proporcionar conforto e segurança aos usuários das rodovias. Entretanto, modificações devem ser implementadas no processo produtivo de misturas asfálticas a quente para minimizar os danos ambientais e aos trabalhadores causados pelo processamento e aplicação a altas temperaturas, porém sem afetar o desempenho dessas misturas (DNIT IPR 747, 2018).

Dentro deste contexto, admite-se que ainda existe a necessidade de estudar em laboratório o efeito de aditivos para misturas mornas no comportamento mecânico das misturas asfálticas. O país está migrando para um novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos, de base mecanístico-empírica, e, é importante considerar o impacto que esta técnica pode eventualmente ter nas espessuras de revestimento calculadas por este novo método.

Também, este ano, o DNIT divulgou na publicação IPR 747, as diretrizes básicas para execução de misturas asfálticas mornas com o uso de aditivos surfactantes, mesmo tipo de aditivo utilizado nesta pesquisa, justificando ser este um tema atual e relevante.

A palavra surfactante é originada da expressão *surface active agent*, ou seja, agentes ativos de superfície. Aditivos surfactantes têm a capacidade de alterar as propriedades superficiais entre o agregado e o ligante, diminuindo sua tensão superficial, promovendo uma melhor lubrificação da mistura, mesmo em temperaturas inferiores, possibilitando uma melhora na trabalhabilidade (JOHNSTON *et al.*, 2015a). Os surfactantes têm sido amplamente utilizados nas indústrias de asfalto.

Os surfactantes são materiais que reduzem a tensão superficial ou interfacial entre um líquido e um sólido ou entre dois líquidos. Os agentes surfactantes podem atuar como detergentes, agentes “molhantes”, emulsionantes, agentes de espumação, dispersantes e agentes *antistriping*. Estes materiais são classificados em quatro grupos: surfactante catiônico, aniônico, anfótero e não iônico (HAMZAH *et al.*, 2014).

O aditivo surfactante utilizado nesta pesquisa foi o Rediset, um aditivo químico fornecido pela *AkzoNobel* na forma sólida e não contém água, ainda pouco utilizado no Brasil quando comparado com outros surfactantes.

CAVALCANTI (2010) faz uso desta mesma tecnologia em misturas com um ligante convencional e com uma abordagem um pouco diferente da adotada neste trabalho. O autor optou por realizar dosagens para todas as misturas estudadas, obtendo diferentes teores. Nesta pesquisa foi adotado o teor obtido pela dosagem de uma mistura a quente de referência, conforme recomendações mais atuais de pesquisadores que estudaram outros aditivos surfactantes. Foi estudado também o efeito deste aditivo em uma mistura produzida com ligante modificado. O comportamento mecânico das misturas com e sem aditivo foi avaliado, acompanhado de uma análise estrutural baseada no novo método mecanístico-empírico.

Rediset é um surfactante catiônico, a “cauda” desse surfactante pode ser um hidrocarboneto alifático de cadeia longa, enquanto sua “cabeça” pode ser um NH_3^+ . A “cabeça” deste aditivo pode exibir propriedade catiônica. A Figura 1 mostra uma forma esquemática deste aditivo, assim como sua interação com um agregado silicoso. Os átomos de sílica podem se ligar ao surfactante catiônico enquanto os íons de cálcio podem se ligar tanto ao surfactante aniônico quanto ao catiônico. Portanto, os surfactantes podem atuar como uma ponte entre o ligante asfáltico e a superfície do agregado, promover a adesão e diminuir a suscetibilidade à umidade das misturas asfálticas. Os compostos ativos de superfície permitem o recobrimento de agregados úmidos que podem ser encontrados com temperaturas de secagem mais baixas (HAMZAH *et al.*, 2014).

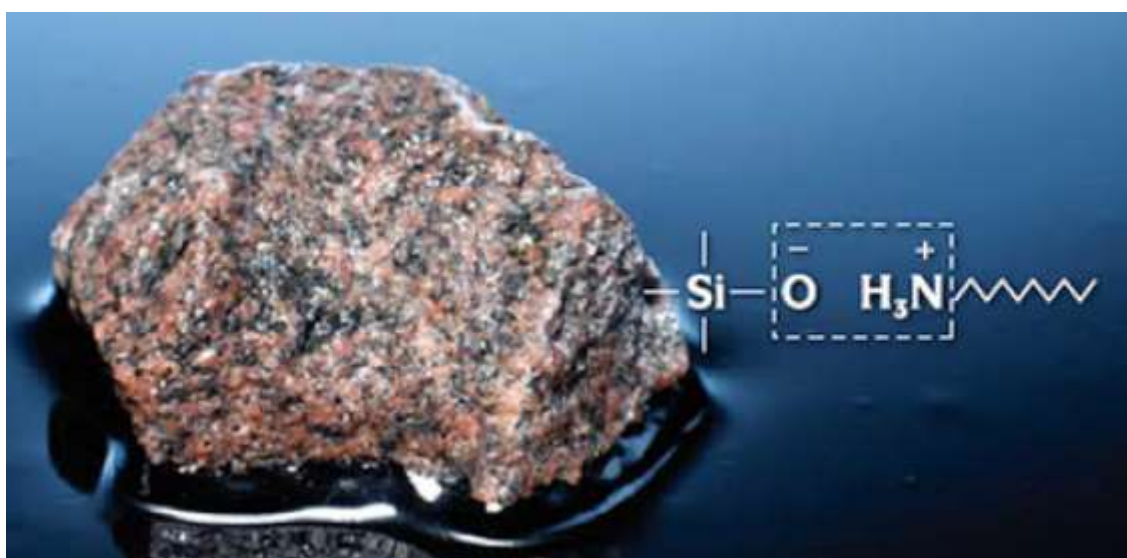


Figura 1: Interação do Rediset com agregado silicoso (AKZONOBEL, 2011)

A influência do aditivo e da dimensão do molde utilizado na compactação do corpo de prova na obtenção dos índices gerados a partir das curvas de densificação do compactador giratório e na adoção dos parâmetros de dosagens ligados a estes índices também foi tópico de análise nesta pesquisa.

O objetivo desta dissertação é a análise do comportamento mecânico em laboratório, de duas misturas asfálticas com o uso de um aditivo surfactante de mistura morna, produzidas com um ligante convencional e um modificado, utilizando os mesmos agregados, a mesma curva granulométrica e o mesmo teor de ligante. Os seguintes objetivos específicos podem ser salientados:

- Analisar o intertravamento dos agregados utilizando o Método Bailey.
- Avaliar o comportamento do aditivo surfactante de mistura morna nas características do ligante convencional e modificado deste estudo.
- Avaliar os índices oriundos das curvas de densificação do compactador giratório, CDI e TDI, e fazer um estudo sobre a viabilidade da utilização do molde de tamanho reduzido na obtenção destes índices.
- Avaliar as misturas mornas em comparação às de referência, por meio de ensaios mecânicos de:
 - Dano por umidade
 - Módulo de resiliência
 - Resistência à tração
 - *Flow Number*
 - Fadiga por compressão diametral
- Avaliação do comportamento das misturas quentes e mornas estudadas por uma pequena análise estrutural com o programa MeDiNa para verificar o efeito dos resultados mecânicos obtidos na vida de fadiga, em duas estruturas hipotéticas.

A dissertação está apresentada em 5 capítulos, incluindo também referências bibliográficas. Estes capítulos foram divididos da seguinte forma:

- Capítulo 1 – introduz o tema, juntamente com os objetivos, justificativa, motivação do trabalho e a forma que o mesmo está apresentado.
- Capítulo 2 – consiste na revisão bibliográfica de misturas mornas, bem como um apanhado das principais pesquisas nacionais sobre o tema.

- Capítulo 3 – contém informações sobre os materiais e procedimentos de laboratório adotados para os ensaios. São apresentados também os resultados da caracterização dos materiais utilizados nesta pesquisa e a dosagem da mistura asfáltica de referência, juntamente com os métodos de caracterização mecânica das mesmas, índices de compactação giratória e procedimento utilizado para análise estrutural. Inclui a normatização utilizada.
- Capítulo 4 – dedicado a apresentação dos resultados dos índices de compactação giratória e dos ensaios mecânicos das misturas, bem como as análises dos mesmos e análise estrutural.
- Capítulo 5 – composto pelas conclusões gerais obtidas nesta pesquisa e pelas sugestões de continuidade de estudos deste tema.

2 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS

Misturas asfálticas mornas é um termo genérico para uma variedade de tecnologias que permitem reduzir as temperaturas de misturas asfálticas quentes. Estas tecnologias podem gerar redução de custos de pavimentação, viabilizar a reciclagem de RAP em maiores taxas, estender a temporada de pavimentação em locais com climas frios, melhorar a compactação do revestimento, permitir que a mistura seja transportada para maiores distâncias e melhorar as condições de trabalho reduzindo a exposição a emissões de combustível e fumos.

As expressões asfalto morno ou mistura morna têm sido usadas no Brasil para representar a sigla em inglês WMA (*Warm Mix Asphalt*) que agrupa uma série de tecnologias que comportam a redução da temperatura em que as misturas asfálticas são produzidas e/ou aplicadas. Estas tecnologias permitem a diminuição da tensão superficial ou da viscosidade do asfalto em temperaturas de 20 a 55°C inferiores a temperatura das misturas quentes (CAVALCANTI, 2010).

As tecnologias WMA são comumente agrupadas em tipos, sendo eles: (i) aditivos químicos que melhoram o recobrimento e a adesividade na mistura asfáltica; (ii) aditivos orgânicos (ceras parafínicas) que alteram a viscosidade do asfalto; (iii) processos de espumação com o asfalto aquecido pela inserção de água e/ou aditivos com água em sua composição (RUBIO, 2011; LTP, 2010; ZAUMANIS, 2010; PERKINS, 2009). Algumas tecnologias se enquadram em mais de uma categoria (PROWELL et al., 2012).

2.1 VANTAGENS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS

PROWELL *et al.* (2012) citam as seguintes vantagens desta tecnologia:

Pavimentação em clima frio: As tecnologias de mistura morna oferecem o potencial para estender a época de pavimentação para climas mais frios. Isso é possível por causa de três fatores. Em primeiro lugar, os aditivos ou processos WMA melhoram a compactação a uma dada temperatura. Em segundo lugar, o WMA é compactável a temperaturas mais baixas do que o HMA. Em terceiro lugar, a velocidade de resfriamento é controlada pela diferença de temperatura entre a mistura asfáltica e o ar ambiente, de modo que uma mistura produzida a uma temperatura mais baixa esfria a uma taxa mais lenta (PROWELL *et al.*, 2012).

Transporte a maiores distâncias: Semelhante ao potencial para estender a época de pavimentação utilizando de tecnologias WMA, as distâncias de transporte mais longas podem ser facilitadas pela menor taxa de resfriamento de WMA e pela compactação melhorada a temperaturas mais baixas (PROWELL *et al.*, 2012).

Ajuda de Compactação: As misturas de asfalto que contêm ligantes asfálticos altamente modificados, aqueles que incorporam altas percentagens de material fresado, tal como RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) ou RAS (*Reclaimed Asphalt Shingles*), ou misturas especiais como SMA (*Stone Matrix Asphalt*) em geral são duros e bastante difíceis de compactar. Esta dificuldade na compactação pode levar a menores densidades durante a construção e a possibilidade de penalidades ao construtor feitas pelo contratante. Como consequência, os empreiteiros podem ser tentados a aumentar as temperaturas de mistura e compactação para assegurar a compactação adequada. Mesmo que a densidade adequada no local seja alcançada, o esforço necessário pode causar desagregação excessiva do agregado ou danificar equipamentos. O uso de tecnologias WMA em temperaturas "típicas" de compactação ajuda a melhorar a compactação dessas misturas mais rígidas (PROWELL *et al.*, 2012).

ZUBARAN (2014) descreve que, de acordo com relatos dos trabalhadores durante a aplicação, não houve dificuldade na compactação, mesmo ocorrendo em temperaturas inferiores.

Uso de maiores percentagens de RAP: As tecnologias de WMA podem ser benéficas para misturas asfálticas contendo altas percentagens de RAP de várias maneiras. Primeiramente, o WMA ajuda na melhor compactação do revestimento. Além disso, o WMA reduz o envelhecimento do ligante asfáltico, resultante das temperaturas de produção mais baixas, podendo ajudar a rejuvenescer o ligante existente no fresado, particularmente em relação à fissuração a baixa temperatura (PROWELL *et al.*, 2012).

ZUBARAN (2014) mostra estudos de laboratório, usinagem e aplicação de mistura morna produzida por espuma de asfalto em um trecho experimental feito com 50 % de fresado.

GENNESSEAUX (2015), como conclusão final do estudo mecânico, observou que a técnica de mistura asfáltica morna tem a vantagem de possibilitar a reciclagem em taxas elevadas de RAP (mais de 25%, atingindo até 50%), sem o comprometimento da qualidade da mistura final.

Uso reduzido de combustível: Cálculos teóricos indicam que uma redução de temperatura de 28°C deve resultar em uma economia de combustível de 11 por cento. A economia de combustível relatada em vários projetos de WMA construídos até 2012 variou de um aumento de 15,4% para uma redução de 77%. A economia média de combustível foi de 23%. O aumento ocorreu com uma tecnologia de emulsão misturada a uma temperatura elevada. Acredita-se que o aumento resultou da energia necessária para vaporizar a água na emulsão e depois aquecer a mistura até uma temperatura elevada (PROWELL *et al.*, 2012).

MOTTA (2011) estimou que houve uma economia de energia de aproximadamente 15% com a redução da temperatura de secagem/vaporização d'água/aquecimento dos agregados em usina na produção das misturas mornas, levando-se em conta as hipóteses adotadas em seus cálculos.

WARGHA FILHO (2013) obteve com o aditivo Gemul® custo praticamente igual ao da mistura de Controle, mesmo com a inserção do aditivo. Isto ocorreu em virtude da pequena quantidade utilizada deste produto e pela expressiva redução da temperatura aplicada, que gerou economia de aproximadamente 28% no combustível utilizado para secagem e aquecimento dos materiais.

MERIGHI (2015) observou em sua pesquisa de campo que a produção da mistura asfáltica morna apresentou economia no consumo de combustível (GLP) em comparação à produção da mistura de referência de aproximadamente 20%.

Emissões Reduzidas: O potencial para reduzir as emissões de substâncias, incluindo gases de efeito estufa, foi o que levou à realização das primeiras experiências com a tecnologia WMA na Europa. A motivação era cumprir regulamentos de emissões mais rigorosos estabelecidos pelo Protocolo de Kyoto (PROWELL *et al.*, 2012).

MOTTA (2011) constatou, pelas análises das emissões de poluentes em laboratório e em campo, que no geral houve redução em cerca de três vezes da concentração total de HPAs (Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos) relativos ao material particulado dos ambientes de mistura morna, em relação àquela a quente.

Condições de Trabalho Melhoradas: A pesquisa mostrou que a quantidade e a natureza dos fumos aos quais os trabalhadores podem estar expostos é afetada pela temperatura (CAVALLARI *et al.*, 2011, CAVALLARI *et al.*, 2012). A redução das temperaturas de mistura pela implantação da WMA reduz as exposições e melhora as condições de trabalho.

MOTTA (2011) comenta que com a melhoria do ambiente de trabalho na pavimentação pode levar a um aumento da produtividade e à melhoria da saúde dos operários.

2.2 TIPOS DE TECNOLOGIA WMA

As tecnologias da WMA se enquadram amplamente numa das três categorias seguintes baseadas no tipo de aditivo, tecnologia ou processo utilizado: (i) processos de formação de espuma (subdivididos em processos contendo água e à base de água); (ii) aditivos orgânicos; (iii) aditivos químicos (RUBIO, 2011; ZAUMANIS, 2010; PERKINS, 2009).

Tecnologias à base de água (*water-based*): Os tecnologias à base de água dependem do processo de formação de espuma quando a água é introduzida numa mistura asfáltica ou no ligante. Quando pequenas quantidades de água são adicionadas a uma mistura, a água vaporiza e é encapsulada no ligante. Isto produz uma ação de formação de espuma no ligante, aumenta temporariamente o volume do mesmo e diminui a sua viscosidade, o que melhora o recobrimento dos agregados e a trabalhabilidade da mistura. Os aditivos à base de água devem adicionar água suficiente para causar a formação de espuma sem excesso que possa criar problemas de *stripping*. Exemplos:

- **Tecnologias de espumação:** O Double Barrel Green, o Ultrafoam GX, o Aquablack WMA e o Warm Mix Asphalt System utilizam algum tipo de bocal para injetar água em um fluxo de ligante asfáltico.

- **Low Energy Asphalt:** No processo de Asfalto de Baixa Energia, o agregado graúdo e uma porção do agregado fino são aquecidos às temperaturas de HMA normais e misturados com o ligante. Um aditivo de recobrimento e melhorador de adesividade (0,5% em peso de ligante) é adicionado ao ligante na linha de fornecimento de asfalto na usina. Depois de recoberta a parte aquecida do agregado, adiciona-se agregado fino, frio e úmido. A porção úmida tem um teor de umidade de 3 a 4%. Quando aquecida, esta umidade é liberada como vapor e faz com que o asfalto espume e encapsule o agregado fino não revestido.

BUDNY (2012), WARGHA FILHO (2013) e ZUBARAN (2014) são exemplos de pesquisas nacionais que fizeram uso desta técnica.

Tecnologias contendo água (*water-bearing*): Tecnologias constituídas por zeólita sintética (*sodium aluminum silicate hydrate*) hidro termicamente cristalizada. A percentagem de água mantida internamente pela zeólita está entre 18 a 21% em massa e é libertada a temperaturas elevadas. Quando esta é adicionada à mistura ao mesmo tempo que o ligante asfáltico, a água é libertada como uma névoa fina, que espuma o ligante. Estes materiais supostamente não alteram o grau de desempenho do ligante (PG). Exemplos:

- **Advera:** é uma zeólita fabricada que é liberada a uma temperatura de 117 °C. Adiciona-se tipicamente Advera a 0,25% em peso total da mistura WMA. A tecnologia permite uma redução de 28° - 39°C da temperatura final da mistura.
- **Aspha-Min:** é uma zeólita sintética finamente pulverizada. O Aspha-Min é tipicamente adicionado a 0,3% em peso total da mistura WMA. A tecnologia permite uma redução de temperatura final da mistura de 30°C.

SOUSA FILHO *et al.* (2007), OTTO (2009), PENZ (2010), PÉREZ (2013) e RIVOIRE JUNIOR (2014) são exemplos de pesquisas nacionais que fizeram uso desta técnica.

Aditivos químicos: Três tecnologias de aditivos químicos são descritas a seguir. Os sistemas de aditivos químicos puros são geralmente simples do ponto de vista de que o componente químico pode ser adicionado ao ligante asfáltico no terminal. Isto resulta em apenas pequenas modificações necessárias para a usina de asfalto ou para o processo de projeto da mistura. A tecnologia denominada *Low Energy Asphalt* é uma combinação de química e tecnologia de espuma à base de água e requer modificações no processo de usinagem e compactação de misturas. Como exemplos de aditivos químicos tem-se:

- **Evotherm:** A tecnologia Evotherm permite que a redução de temperatura de usinagem e de compactação de misturas mornas seja da ordem de 50 a 75°C em comparação com uma mistura em temperatura convencional (D'ANGELO et al., 2008).
- **Low Emission Asphalt:** O Asfalto de Baixa Emissão é produzido pelo Processo de Baixa Energia já descrito. Este processo baseia-se na mistura sequencial do ligante asfáltico contendo um aditivo químico sendo adicionado aos agregados graúdos quentes, seguido pela introdução de areia molhada, o que cria uma ação de formação de espuma.
- **Rediset WMX:** Rediset é um aditivo químico na forma de *pellet* e não contém água. O material é adicionado a taxa de 1,5 a 2,0% em peso de ligante. As temperaturas de produção são reduzidas em até 33 °C. O material pode ser adicionado ao ligante no terminal, no tanque de fornecimento da usina ou durante a mistura, o que significa que as modificações da instalação são relativamente menores. Este é o aditivo que será usado na presente pesquisa.

CAVALCANTI (2010), MOTTA (2011), PÉREZ (2013), WARGHA FILHO (2013), GENNESSAEUX (2015), JOHNSTON *et al.* (2015a, 2015b), MERIGHI (2015), ENGELKE *et al.* (2016), MOCELIN *et al.* (2016), BARROS (2017) e CONCEPA (2017) são exemplos de pesquisas nacionais que fizeram uso desta técnica.

Aditivos orgânicos: Adicionam-se aditivos orgânicos ao ligante para reduzir a sua viscosidade. Estes materiais têm tipicamente pontos de amolecimento abaixo das temperaturas de produção de HMA normais. Em temperaturas superiores à do ponto de amolecimento, estes materiais reduzem a viscosidade do ligante tornando possível a produção de misturas de concreto asfáltico a temperaturas mais baixas. Abaixo do ponto de amolecimento, eles tendem a aumentar a rigidez do ligante. Como exemplo cita-se:

- **Sasobit:** é uma cera sintética de cadeia longa, fina e cristalina. O material é adicionado a 3 a 4% em peso da mistura total. A cera derrete a 117 °C e reduz a viscosidade do aglutinante nas temperaturas da planta e de compactação. São necessárias modificações da planta na forma de uma unidade de mistura para agitar Sasobit no ligante quente antes da mistura com o agregado.

WARGHA FILHO (2013) e FEITOSA (2015) são exemplos de pesquisas nacionais que fizeram uso desta técnica.

2.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA REDISSET WMX

Rediset WMX foi o aditivo de mistura morna utilizado na presente pesquisa, e, portanto, apresentam-se uma revisão conceitual e bibliografias que também tenham feito uso deste aditivo, para um melhor entendimento do funcionamento do mesmo. O Rediset WMX é um aditivo químico fornecido pela *AkzoNobel* na forma sólida e não contém água.

Rediset é um aditivo WMA multifuncional que reduz a temperatura de mistura e compactação de WMA com base em dois mecanismos. O primeiro mecanismo reduz a viscosidade dos ligantes asfálticos pela presença de aditivos orgânicos, ceras. O segundo mecanismo de redução regula e diminui as forças de atrito na interface do agregado e do ligante asfáltico em altas faixas de temperatura, por exemplo entre 85 e 140°C, com o uso de aditivos químicos. Rediset é uma combinação do surfactante (agente ativo de superfície) e aditivos orgânicos (modificador de reologia) (HAMZAH *et al.*, 2014).

Segundo ALMEIDA e LOGARAJ (2010) os vários testes e aplicações comerciais do sistema Rediset WMX realizados nos dois anos anteriores a publicação confirmaram que o produto oferece um efeito de mistura morna, com benefícios adicionais na melhor resistência à água das misturas. As propriedades do ligante foram mantidas ou melhoradas. Medições de viscosidade no ligante por si só não preveem totalmente a redução de temperaturas da mistura asfáltica, de mistura e de compactação, que podem ser alcançadas no campo pelo uso deste aditivo.

De acordo com o fabricante, os principais benefícios e recursos do produto que podem ser citados são:

- Redução na temperatura de mistura e de compactação: Rediset WMX-8017A permite uma redução nas temperaturas mesmo para as misturas mais difíceis de compactar, melhorando a trabalhabilidade;
- Aderência: As misturas preparadas com Rediset WMX-8017A satisfazem os requisitos de resistência ao dano por umidade sem a necessidade de agentes melhoradores de adesividade adicionais;
- Efeito neutro no grau de desempenho (PG): O produto Rediset WMX-8017A pode ser utilizado em doses elevadas sem comprometer a classificação PG do ligante;
- Facilidade de uso e armazenamento: A forma de grãos permite armazenamento sem calor e fácil adição ao ligante asfáltico.

Desde a introdução do Rediset WMX em 2007, muitos ensaios de campo com bom desempenho e projetos de maior escala foram concluídos em todo os Estados Unidos, bem como na Europa, Canadá, Brasil, Argentina, África do Sul e China (PROWELL *et al.*, 2012).

Segundo PROWELL *et al.* (2012), Rediset modifica o ligante asfáltico de modo a reduzir a sua tensão superficial, o que aumenta a sua capacidade de recobrir a superfície do agregado e melhora a trabalhabilidade da mistura. Os componentes da Rediset permitem o recobrimento e a compactação a temperaturas reduzidas em até 60 °F (33 °C). Os agentes de adesão ativos promovem a ligação entre o ligante asfáltico e a superfície do agregado, mesmo se houver água residual presente na superfície do agregado.

O Rediset é adicionado à mistura asfáltica de diversas formas e sem alterações no procedimento de projeto da mistura, exceto pelas temperaturas de mistura e compactação. Na maioria dos casos o produto vai ser pré-misturado com o ligante, com ou sem misturador de alto cisalhamento, na refinaria, terminal de asfalto ou usina de mistura quente. Alternativamente, Rediset WMX pode ser adicionado diretamente à mistura, de preferência logo após a adição do ligante. A utilização de ligante pré-misturado não requer modificações na instalação de mistura a quente. Em aplicações comerciais, o ligante tratado com o produto mostrou-se estável durante pelo menos duas semanas a temperaturas de armazenamento de asfalto. Também pode ser armazenado como um líquido em um tanque pequeno aquecido e, em seguida, injetado na linha de asfalto (PROWELL *et al.*, 2012).

CHARIWALA *et al.* (2016) obtiveram uma redução de 30° a 40°C na temperatura de mistura e compactação da mistura betuminosa adicionando 2% de Rediset WMX e satisfazendo todas as exigências volumétricas à temperatura mais baixas. Os resultados e propriedades volumétricas indicam que a melhor temperatura de compactação foi cerca de 120°C.

JONES *et al.* (2010) avaliaram a utilização do aditivo do ponto de vista dos laboratoristas, por entrevistas, que revelaram não haver problemas com a preparação de corpos de prova a temperaturas 35°C mais baixas que as convencionais. Condições de trabalho melhores e mais seguras devido a temperaturas mais baixas foram identificadas como uma vantagem.

JONES *et al.* (2010) também avaliaram a mistura morna tecnicamente em comparação com uma mistura a quente de referência. Não foram observados problemas na produção e compactação da mistura com o produto a temperaturas mais baixas no laboratório. Os teores de vazios de ar de corpos de prova individuais foram semelhantes para ambas as misturas, indicando que amostras de mistura morna podem ser misturadas e compactadas em laboratório satisfatoriamente. Nos ensaios de cisalhamento, fadiga, *Hamburg Wheel Track* e *Cântabro*, os resultados indicaram desempenho semelhante entre as duas misturas. Nos ensaios de dano por umidade induzida, a mistura de Rediset apresentou resistência à umidade significativamente melhor que a referência.

PEREIRA (2010) recomenda manter a temperatura de usinagem do ligante, mesmo com a presença do aditivo. Segundo o autor, os agregados é que devem ser adicionados a uma temperatura inferior de modo a se verificar o efeito desejado, ou seja, a produção das misturas a temperaturas inferiores às misturas convencionais. O ensaio de estabilidade de armazenamento não apresentou diferenças significativas, podendo-se confirmar a não alterabilidade do asfalto com o aditivo, durante o armazenamento e transporte.

Pelos resultados de PEREIRA (2010), verificou-se que a utilização de 1,0% de aditivo é a que apresenta melhores resultados, com uma redução de 50°C na temperatura de mistura e compactação. Excessiva quantidade do aditivo no ligante vai funcionar como um lubrificante, facilitando o movimento dos agregados que constituem a mistura e penalizando seu volume de vazios e estabilidade.

CAVALCANTI (2010) analisou os resultados de DSR (*Dynamic Shear Rheometer*) referentes ao CAP30/45 + 2% de Rediset mostrando uma queda de rigidez significativa em comparação com o ligante CAP30/45 puro na condição sem envelhecimento. Ainda assim, o ligante continuou classificado como um PG70. A penetração pouco maior e o ponto de amolecimento ligeiramente menor encontrados, caracterizaram o ligante modificado com Rediset como um ligante mais mole do que o ligante puro. Os ligantes modificados com este produto, embora permitam a diminuição da temperatura de mistura e compactação, não apresentam sua curva de viscosidade muito diferente do ligante puro, por isto sua incorporação à mistura foi feita com a temperatura obtida na curva de viscosidade do ligante puro, reduzindo-se apenas a temperatura dos agregados.

CAVALCANTI (2010) observou que, nos resultados obtidos pelas misturas mornas moldadas no compactador giratório, compactadas a 130°C e 120°C, com o mesmo teor de ligante, a diferença entre as temperaturas de compactação não influenciou os valores de módulo de resiliência (MR). Quando se variou o teor de ligante, houve uma pequena diferença entre MRs obtidos na mistura compactada a 110°C para as outras. O autor optou por não realizar condicionamento de curto prazo na estufa das misturas mornas, devido à baixa temperatura em que são produzidas e compactadas que tem justamente o objetivo de exercer envelhecimento em curto prazo bem inferior às misturas a quente convencionais. Também observou melhora significativa na adesividade da mistura morna em relação a referência.

De acordo com CAVALCANTI (2010), comparando a mistura morna compactada à temperatura de 130°C e a mistura quente de referência, observou-se que houve uma diferença de 3cm entre os valores obtidos da espessura da camada de revestimento utilizando o *software* SisPav, sendo maior para a mistura morna. Esta diferença mostra que a vida de fadiga foi interferida negativamente pela adição do aditivo de mistura morna.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo contém informações sobre os materiais e procedimentos laboratoriais adotados para execução dos corpos de prova, dos ensaios e para as análises estruturais. São apresentados também os resultados da caracterização dos materiais utilizados na pesquisa e a dosagem da mistura asfáltica de referência, juntamente com os métodos de caracterização mecânica das misturas e índices de compactação giratória. Inclui a normatização utilizada.

3.1 AGREGADOS E CURVA GRANULOMÉTRICA

Os agregados utilizados nesta pesquisa são procedentes da Magé Mineração, localizada no município de Magé, Rio de Janeiro. Os mesmos foram cedidos pela Concessionária Rio Teresópolis (CRT). Os materiais pétreos, de origem granito-gnáissica, foram entregues no Laboratório de Pavimentos da COPPE em três frações, a saber: brita 1, brita 0 e pó de pedra.

3.1.1 Granulometria dos agregados e da mistura

A distribuição granulométrica dos agregados efetivamente influi no comportamento dos revestimentos asfálticos e é uma de suas principais características. Em misturas asfálticas a distribuição granulométrica do agregado influencia a maioria das propriedades importantes incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida, etc. (BERNUCCI et al., 2010).

A granulometria dos agregados foi determinada conforme preconiza a norma DNER ME 083/98, onde o método está descrito. A composição granulométrica adotada nesta pesquisa foi a utilizada em um projeto do Laboratório de Pavimentação da COPPE, que fez uso do mesmo agregado. Na Tabela 1 está disponível a composição granulométrica de cada fração do agregado, bem como da mistura final.

Tabela 1: Distribuição granulométrica dos agregados e da composição utilizada para misturas asfálticas desta pesquisa

Peneiras		% Passante			
ASTM	mm	Brita 1	Brita 0	Pó de pedra	Mistura
2"	50,00	100,0	100,0	100,0	100,0
1 1/2"	37,50	100,0	100,0	100,0	100,0
1"	25,00	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,00	94,0	100,0	100,0	98,5
1/2"	12,50	14,0	99,0	100,0	78,7
3/8"	9,50	2,0	83,0	100,0	69,6
#4	4,75	1,0	13,0	100,0	42,3
#8	2,36	1,0	3,0	79,0	30,6
#16	1,18	1,0	3,0	60,0	23,6
#30	0,60	1,0	2,0	46,0	18,0
#50	0,30	1,0	2,0	32,0	12,9
#100	0,15	1,0	2,0	20,0	8,4
#200	0,075	1,0	1,0	10,0	4,3
Composição		24,3	38,7	37,0	100,0

A especificação de serviço DNIT ES 031/2006 - ES especifica três faixas granulométricas de agregados para misturas asfálticas densas. A granulometria indicada na Tabela 1 encaixa-se na faixa granulométrica B, recomendada tanto para capa como para camada de ligação. A composição da mistura de agregados resultou no emprego de 24,3% de brita 1, 38,7% de brita 0 e 37,0% de pó de pedra na composição da curva utilizada. Na Figura 2 está ilustrada a curva granulométrica da mistura final de agregados. Definiu-se também o tamanho máximo nominal (TMN) dos agregados como sendo TMN = 19mm, que é a abertura de malha de peneira imediatamente maior do que a da primeira peneira a reter mais de 10% do material.

Para atender aos requisitos de projeto volumétrico de misturas *Superpave*, de acordo com a AASHTO M 323-13, a curva granulométrica deve estar contida entre pontos de controle nela especificados pela norma função do TMN do agregado, e que se evitem misturas com granulometria sobre a linha de densidade máxima. A curva granulométrica é plotada num gráfico cujo eixo das abscissas é representado pelo tamanho das malhas das peneiras em mm elevado à potência de 0,45 e o eixo das ordenadas representa a porcentagem passante nessas peneiras. A Figura 3 mostra a curva granulométrica da mistura de agregados nesta configuração, juntamente com os limites e pontos de controle.

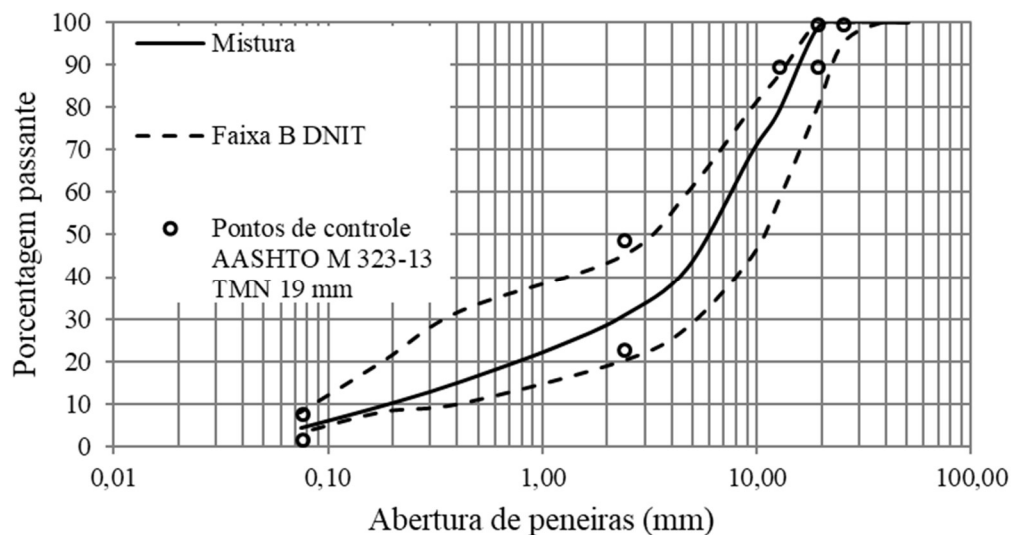


Figura 2: Curva granulométrica final da mistura de agregados desta pesquisa

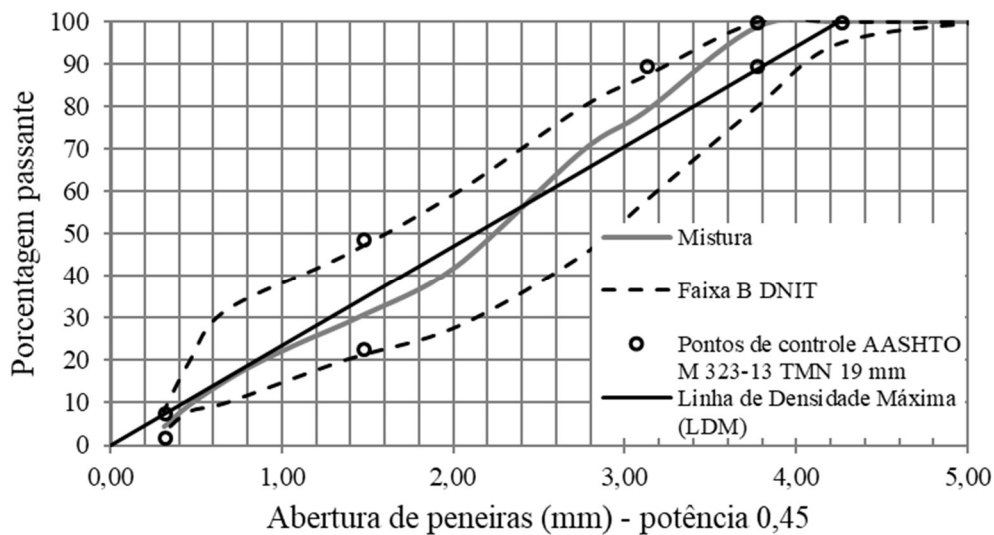


Figura 3: Curva granulométrica final da mistura de agregados desta pesquisa indicada na potência 0,45

3.1.2 Caracterização do agregado

Os ensaios de densidade e absorção foram realizados seguindo as normas DNER-ME 081 para agregados graúdos. Os agregados finos têm sua densidade real determinada pelo procedimento da norma DNER-ME 084. Os resultados dos ensaios de densidade e absorção dos agregados utilizados estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados dos ensaios de densidade e absorção dos agregados usados nesta pesquisa

Agregado	Procedimento	Densidade Real	Densidade Aparente	Absorção (%)
Brita 1	DNER-ME 081	2,889	2,844	0,55
Brita 0	DNER-ME 081	2,849	2,752	1,25
Pó de pedra	DNER-ME 084	2,766	2,766*	ND

ND = não determinado

* adotado

Quando se trabalha com uma mistura de duas ou mais frações (ou dois ou mais agregados), pode-se computar um valor para a massa específica média através de um valor ponderado das várias frações (agregados) que constituem a mistura. O cálculo da massa específica aparente da mistura de agregados foi feito de acordo com a norma DNER-ME 081, utilizando as percentagens e massas específicas aparentes (convertidas a partir da densidade aparente) de cada fração. Neste cálculo foi considerada a massa específica aparente do pó de pedra como sendo a mesma que a real, obtendo uma massa específica aparente da mistura de $2,788 \text{ g/cm}^3$, sendo este um procedimento padrão do Laboratório de Pavimentos da COPPE/UFRJ.

De acordo com INSTITUTO DO ASFALTO (2001) a densidade relativa aparente do filer mineral é de difícil determinação, podendo-se utilizar em seu lugar a densidade relativa real, sendo o erro, usualmente, desprezível. PINTO (1998 apud BERNUCCI *et al.*, 2010) recomenda que a massa específica aparente média seja obtida com os valores de massa específica aparente dos agregados graúdos e real para o filer mineral usado.

Contudo, em sua dissertação, NASCIMENTO (2008) mostra a influência desta simplificação, considerar a densidade aparente do filer igual a real, na obtenção das propriedades volumétricas da mistura. O autor demonstra para uma de suas misturas que uma pequena variação na densidade específica aparente dos agregados impactou significativamente as propriedades volumétricas da mesma.

Para avaliar os agregados quanto à resistência mecânica, foram realizados ensaios de abrasão Los Angeles dos agregados graúdos de acordo com o procedimento DNER ME 035/94. A Tabela 3 apresenta os valores obtidos do ensaio de abrasão, juntamente com os limites especificados pelo DNIT.

Tabela 3: Resultados dos ensaios de abrasão Los Angeles dos agregados desta pesquisa

Agregado	Procedimento	Abrasão Los Angeles (%)	Limite - DNIT ES 031
Brita 1	DNER-ME 035	30	$\leq 50\%$
Brita 0	DNER-ME 035	30	$\leq 50\%$

Os agregados miúdos não são testados quanto à sua resistência mecânica, mas o ensaio de equivalente de areia foi realizado para se determinar a porcentagem de material deletério fino contido no pó de pedra. Os procedimentos utilizados para este ensaio seguem o especificado no método de ensaio DNER ME 054/94. A Tabela 4 mostra o resultado do ensaio, juntamente com os limites especificados pelo DNIT.

Embora seja prática corrente se realizar este ensaio de equivalente de areia para materiais britados, na origem deste ensaio (MEDINA, 1962) estava uma preocupação de detectar finos argilosos de agregados naturais que, eventualmente, fossem impactar a mistura asfáltica por serem expansivos ou mesmo finos demais agindo mais como filer ativo. No material britado esta preocupação é menor.

Tabela 4: Resultado dos ensaios de equivalente de areia

Agregado	Procedimento	Equivalente de areia (%)	Limite - DNIT ES 031
Pó de pedra	DNER-ME 054	61	$\geq 55\%$

3.1.3 AIMS 2: Forma, angularidade e textura

As propriedades de forma de agregado, como forma, angularidade e textura superficial, influenciam muito o desempenho da mistura asfáltica. A deformação permanente está relacionada com a angularidade e forma do agregado, o que afeta o intertravamento entre as partículas. O trincamento por fadiga pode ser reduzido por uma textura superficial rugosa de agregado, o que melhora a interação agregado-ligante (BESSA *et al.* 2015). Vários pesquisadores vêm estudando novas técnicas automatizadas e mais precisas, como o *Aggregate Image Measurement System* (AIMS), para melhorar a determinação de parâmetros de forma de agregados.

Nesta pesquisa foi utilizado o equipamento *Aggregate Image Measurement System 2* (AIMS 2), cuja norma brasileira está em preparação, baseada nas normas AASTHO PP 64-10 e TP 81-10, para a quantificação de características relacionadas à forma, angularidade e textura superficial de agregados por análises digitais de imagens bi e tridimensionais das partículas de agregados. O equipamento tem um programa computacional acoplado que analisa os agregados finos e graúdos posicionados em suas respectivas bandejas, colocadas na plataforma giratória, e por imagens são avaliadas cada propriedade selecionada para os agregados. A Figura 4 mostra o AIMS 2 utilizado nesta pesquisa.



Figura 4: Equipamento AIMS 2

Além de apresentar medidas mais objetivas, diretas, independentes das habilidades do operador e melhor correlacionadas com o desempenho de misturas asfálticas do que outras metodologias, o sistema AIMS 2 também fornece simultaneamente resultados para as diversas propriedades de forma de agregados em um tempo, aproximadamente, 72% inferior ao necessário para obter as propriedades especificadas pela metodologia *Superpave* (PAZOS, 2015).

BESSA *et al.* (2015) apresentam uma análise de agregados de três diferentes fontes mineralógicas, investigando a influência das propriedades da forma no projeto de misturas asfálticas e nas propriedades mecânicas das mesmas. Os resultados indicaram que os agregados possuíam propriedades de forma semelhantes, apesar das diferenças na composição mineralógica. Isso pode ser um efeito direto de procedimentos similares de exploração de pedreiras. A textura superficial resultou em valores diferentes. Os autores constataram que em geral, as propriedades da forma dos agregados resultaram em amostras com comportamento mecânico semelhante.

Durante os ensaios, o material foi posicionado nas ranhuras de bandejas circulares, correspondente ao diâmetro médio das partículas separadas por peneiras, evitando o contato entre elas, visto que o AIMS 2 faz uso de um algoritmo que identifica as partículas que se tocam, excluindo-as da análise.

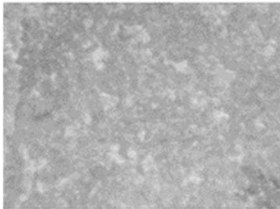
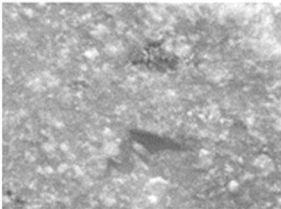
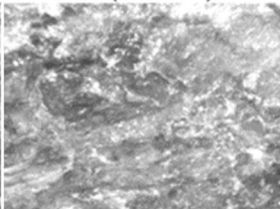
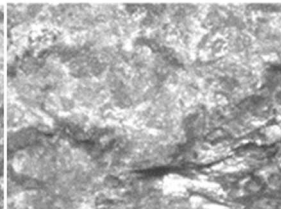
Após posicionamento e contagem das partículas, de acordo com a Tabela 5, o equipamento realiza três ciclos para medir a forma 2D do agregado e a angularidade, as dimensões dos agregados, e por último a textura. Para o agregado miúdo só é realizado o primeiro ciclo dos três, fornecendo apenas a medida da forma 2D e angularidade. O processamento é possível para materiais retidos entre as peneiras de 25mm (1”) até 0,075mm (#200), sendo considerado finos os materiais passantes na peneira 4,75mm (#4).

Tabela 5: Quantidades mínimas de partículas para ensaios no sistema AIMS 2 (PINE INSTRUMENT COMPANY, 2011)

Tamanho da peneira	Número de partículas sugerido
0,075 mm (#200)	150
0,15 mm (#100)	150
0,3 mm (#50)	150
0,6 mm (#30)	150
1,18 mm (#16)	150
2,36 mm (#8)	150
4,75 mm (#4)	50
6,35 mm (1/4")	50
9,5 mm (3/8")	50
12,5 mm (1/2")	50
19,0 mm (3/4")	50
25,0 mm (1")	50

Podem ser realizadas quatro análises diferentes no AIMS 2: *Shape*, *Stockpile*, *Dregadation (MicroDeval)* e *Surface*. Para os agregados desta pesquisa foi feita a análise *Stockpile*, que é projetada para capturar as características de forma de uma fração inteira de agregado, dividida em tamanhos de peneira padrão *Superpave*. Cada tamanho da fração é analisado separadamente para angularidade (graúda e miúda), forma 2D (miúda), textura (graúda), esfericidade (graúda) e achatamento e alongamento (graúda). A proporção (por massa) é inserida na planilha gerada e os dados da amostra são combinados em uma caracterização ponderada para a fração. Os limites para análise e classificação das propriedades, baseado no manual do equipamento, estão na Tabela 6.

Tabela 6: Classificação das características fornecidas pelo AIMS 2 (Adaptado de PINE INSTRUMENT COMPANY, 2011)

Angularidade do Agregado Graúdo e Miúdo			
Escala Krumbein = 0,6	Escala Krumbein = 0,4	Escala Krumbein = 0,1	Fora da Escala Krumbein
			
0 ≤ Baixo ≤ 2100 (Arredondado)	2100 < Moderado ≤ 3975	3975 < Alto ≤ 5400	5400 < Extremo ≤ 10000 (Extremamente Angular)
Forma do Agregado Miúdo (Forma 2D)			
			
0 ≤ Baixo ≤ 6,5 (Circular)	6,5 < Moderado ≤ 8	8 < Alto ≤ 10	10 < Extremo ≤ 20 (Alongado)
Textura do Agregado Graúdo			
			
0 ≤ Baixo (Macio) ≤ 200	200 < Moderado ≤ 500	500 < Alto ≤ 750	750 < Extremo ≤ 1000

O índice Forma 2D aplica-se apenas em agregados miúdos e quantifica a forma relativa a partir de imagens bidimensionais das partículas de agregados. Este índice tem uma escala relativa de 0 a 20, onde um círculo perfeito tem um valor igual a zero.

A angularidade aplica-se para agregados miúdos e graúdos e descreve variações no limite de partículas que influenciam a forma geral, é analisada de acordo com a agudeza dos cantos por imagens 2D feitas de partículas do agregado. A angularidade tem uma escala relativa de 0 a 10000, com um círculo perfeito tendo um valor pequeno não nulo perfeito, ou seja, quanto maior a gradiente, mais angular é a partícula.

A textura descreve a suavidade ou rugosidade relativa das superfícies das partículas de agregados. O índice de textura aplica-se somente aos tamanhos de agregados graúdos e descreve a microtextura da superfície, com menos de 0,5 mm de tamanho, sendo variações muito pequenas para afetar a forma geral da partícula. A textura tem uma escala relativa de 0 a 1000, com uma superfície polida lisa aproximando-se de um valor de 0.

A esfericidade se aplica aos agregados graúdos e descreve a forma tridimensional geral de uma partícula. Este índice tem uma escala relativa de 0 a 1, onde o valor de esfericidade de 1 indica que uma partícula tem as três dimensões iguais (cúbica).

As propriedades *Flat & Elongated* (F&L) é a razão entre a maior e menor dimensão da partícula e *Coarse Aggregate Angularity Texture Value* (CAAT) indica o valor de angularidade e textura combinados das partículas graúdas.

Os resultados da análise do AIMS 2 das frações de agregados nesta pesquisa usados, para a caracterização de propriedades como forma, angularidade e textura, estão todos apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Resultados para a análise dos agregados deste estudo no AIMS 2

Propriedade do AIMS 2	Frações		
	Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra
Forma 2D	-	-	8,08
Angularidade	2833,7	2751,6	2746,9
F&E 2:1	59,60%	52,50%	-
F&E 3:1	21,40%	15,60%	-
F&E 5:1	1,30%	0,00%	-
Textura	437	508,5	-
Esfericidade	0,62	0,66	-
Angularidade - Textura do Agregado Graúdo (CAAT)	5787,4	6695	-

A norma AASHTO M 323-13 especifica que o agregado utilizado na mistura asfáltica deve ter uma proporção máxima de 10% de partículas com razão 5:1 (*Flat & Elongated* - F&L). Pela Tabela 7 pode-se observar que o agregado utilizado atende a especificação, com uma proporção máxima de partículas nesta razão de 1,30%. Vale ressaltar que a AASHTO M 323-13 indica que a medição desta propriedade das partículas seja feita de forma manual, de acordo com a ASTM D4791.

Pela Tabela 7 pode-se caracterizar o material utilizado de acordo com os intervalos sugeridos no manual do AIMS, descritos na Tabela 6, nas três frações quanto ao parâmetro de angularidade como sendo um agregado de angularidade moderada, a coerência entre as frações se deve ao fato de serem materiais britados provenientes da mesma pedra. O pó de pedra apresenta um valor alto de forma 2D, sendo mais alongado, podendo-se atribuir este alto valor da forma ao processo de britagem. A textura do agregado ficou classificada como moderada para as duas frações de agregado graúdo, sendo o resultado coerente já que se tratam de frações provenientes do mesmo mineral.

IBIAPINA *et al.* (2018) propuseram um sistema de classificação das propriedades de forma baseado nos resultados do sistema AIMS2, a partir de um banco de dados composto por agregados de mineralogias distintas, oriundos de diferentes localizações no Brasil. O artigo citado ainda não foi publicado e a classificação nele proposta, apresentada na Tabela 8, vai estar na norma do DNIT em elaboração.

Tabela 8: Limites da classificação proposta para agregados brasileiros (IBIAPINA *et al.*, 2018)

Propriedade		Valores limites			
Forma 2D	< 4,0	4,0 - 11,0	11,0 - 15,5	> 15,5	-
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	-
Angularidade	< 1260	1260 - 4080	4080 - 7180	> 7180	-
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	-
Esfericidade	< 0,5	0,5 - 0,7	0,7 - 0,9	> 0,9	-
	Achatado/ Alongado	Baixa esfericidade	Esfericidade moderada	Alta esfericidade	-
Textura	< 260	260 - 440	440 - 600	600 - 825	> 825
	Polido	Macio	Baixa rugosidade	Rugosidade moderada	Alta rugosidade

A Tabela 9 apresenta a classificação das frações do agregado utilizado de acordo com os limites estipulados por IBIAPINA *et al.* (2018) para agregados brasileiros. Os autores sugerem usar a classificação proposta para comparar os resultados de propriedades de forma dos agregados com os resultados do comportamento mecânico de misturas asfálticas e definir valores limites que descartariam agregados para projetos de misturas asfálticas e para outras aplicações na Engenharia Civil. Porém, como estes valores limites ainda não foram estipulados, as propriedades do agregado utilizado nesta pesquisa foram consideradas aceitáveis.

Tabela 9: Classificação das frações de agregado desta pesquisa de acordo com IBIAPINA *et al.* (2018)

Propriedade do AIMS 2	Classificação IBIAPINA <i>et al.</i> , 2018		
	Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra
Forma 2D	-	-	Semicircular
Angularidade	Subarredondado	Subarredondado	Subarredondado
Textura	Macio	Baixa rugosidade	-
Esfericidade	Baixa esfericidade	Baixa esfericidade	-

3.1.4 Análise do esqueleto pétreo pelo Método Bailey

O Método Bailey foi concebido pelo engenheiro Robert Bailey do DOT (Departamento de Transportes) de Illinois, EUA, baseado em sua experiência com projeto de misturas asfálticas. Bailey desenvolveu o método como uma forma de seleção granulométrica, onde o intertravamento entre os agregados é selecionado como um dado de entrada de projeto, buscando gerar misturas densas ou descontínuas resistentes à deformação permanente, mantendo suas características de durabilidade adequadas.

Para garantir uma quantidade ideal de asfalto, os vazios no agregado mineral (VAM) podem ser ajustados variando a quantidade dos agregados graúdos e finos na mistura. Assim, as misturas selecionadas podem ter um arranjo de agregados bem proporcionado, para uma elevada estabilidade, e ao mesmo tempo um valor adequado de relação betume-vazios (RBV), para uma boa durabilidade. (VAVRIK *et al.*, 2002a; FERNANDES JUNIOR *et al.*, 2004).

O arranjo ou empacotamento dos agregados e a definição de agregados graúdos e miúdos são os dois princípios que são a base do Método Bailey para a relação entre os parâmetros volumétricos da mistura e a granulometria dos agregados.

O intertravamento dos agregados é obtido pela análise dos ensaios de massa específica solta e compactada, realizados conforme preconiza a AASHTO T 19-09. Resumidamente, a massa específica solta dos agregados graúdos da mistura expressa a quantidade de agregados necessária para preencher um dado recipiente, sem qualquer tipo de esforço de compactação, representando a situação de contato mínimo entre partículas. A massa específica compactada dos agregados graúdos e finos também é a quantidade de agregados necessária para preencher um dado recipiente, porém com a aplicação de um esforço de compactação que diminui os vazios e aumenta o contato entre as partículas (NASCIMENTO, 2008).

A definição tradicional de agregado graúdo classifica-o como sendo todo material retido na peneira de 4,75 mm. No Método Bailey a definição de agregados graúdos e finos é mais específica, variando com o tamanho máximo nominal (TMN) da mistura de agregados, visando gerar um melhor intertravamento e empacotamento do esqueleto pétreo. O agregado graúdo é definido como partículas graúdas de agregados que, quando colocadas em uma unidade de volume, criam vazios. O agregado miúdo, por sua vez, são partículas de agregado que podem preencher os vazios criados pelo agregado graúdo na mistura.

Conforme descrito em VAVRIK *et al.* (2002^a), o método define quatro peneiras de controle em função do TMN do agregado, chamadas de Peneiras de Controle Primário, Secundário, Terciário e Peneira Média (PCP, PCS, PCT e PM, respectivamente), conforme apresentado na Tabela 10. Caso a mistura apresente comportamento fino, novas peneiras de controle são determinadas, conforme a Tabela 11.

Tabela 10: Peneiras de Controle para diversas Misturas Asfálticas pelo Método Bailey (VAVRIK *et al.*, 2002a)

Controles		Abertura da peneira (mm)				
TMN	37,50	25,00	19,00	12,50	9,50	4,75
PM	19,00	12,50	9,50	6,25	4,75	2,36
PCP	9,50	4,75	4,75	2,36	2,36	1,18
PCS	2,36	1,18	1,18	0,60	0,60	0,30
PCT	0,60	0,30	0,30	0,150	0,150	0,075

Tabela 11: Peneiras de Controle para Mistura de Granulometria Fina pelo Método Bailey (VAVRIK *et al.*, 2002a)

Controles	Abertura da peneira (mm)					
TMN	37,50	25,00	19,00	12,50	9,50	4,75
PCP Original	9,50	4,75	4,75	2,36	2,36	1,18
Nova PM	4,75	2,36	2,36	1,18	1,18	0,60
Nova PCP	2,36	1,18	1,18	0,60	0,60	0,30
Nova PCS	0,60	0,30	0,30	0,15	0,15	0,075
Nova PCT	0,15	0,075	0,075	—	—	—

As peneiras são usadas para classificar as frações de agregados de acordo com o seu tamanho em:

- Agregado gráudo (AG) – todo material retido na PCP;
- Agregado gráudo do agregado fino (GAF) - material que passa na PCP e fica retido na PCS;
- Agregado fino do agregado fino (FAF) - material que passa na PCS.

As peneiras PM e PCT são usadas, respectivamente, no cálculo da avaliação da proporção AG e da proporção FAF da mistura. As proporções AG, GAF e FAF são parâmetros utilizados pelo Método Bailey e são definidas através das Equações 01, 02 e 03:

$$\text{Proporção AG} = \frac{(\% \text{ passante na PM} - \% \text{ passante na PCP})}{(100\% - \% \text{ passante na PM})} \quad (01)$$

$$\text{Proporção GAF} = \frac{\% \text{ passante na PCS}}{\% \text{ passante na PCP}} \quad (02)$$

$$\text{Proporção FAF} = \frac{\% \text{ passante na PCT}}{\% \text{ passante na PCS}} \quad (03)$$

Cunha (2004) destaca a importância da proporção AG e afirma que misturas com AG abaixo do recomendado são susceptíveis à segregação. Já aquelas com AG elevado podem resultar em problemas de compactabilidade. Quando a proporção AG aumenta em torno de 1,0, o VAM irá aumentar. Porém, à medida que esse valor se aproxima de 1,0, a fração de agregado gráudo se torna “desequilibrada” porque os agregados de tamanho interceptor tentam controlar o esqueleto de agregado gráudo (VAVRIK *et al.*, 2002a).

Entender o arranjo de agregado graúdo requer a introdução do conceito da Peneira Média. A peneira média é definida como aquela correspondente a metade do TMN. Agregados passantes nesta peneira são chamados “interceptores”. Os interceptores são grandes o suficiente para caber nos vazios criados pelas maiores partículas de agregado graúdo e conseqüentemente separá-los. Estes agregados podem ser usados para ajustar as propriedades volumétricas da mistura. Modificando a quantidade de interceptores, é possível mudar o VAM na mistura para produzir uma estrutura de agregado graúdo equilibrada. Com uma estrutura equilibrada, a mistura deve ser fácil de compactar no campo e deve apresentar um desempenho adequado sob carregamento (VAVRIK *et al.*, 2002b).

A proporção GAF está relacionada com o tipo da granulometria da mistura. Misturas com GAF abaixo dos limites do método geralmente têm graduação não uniforme, podem ser instáveis e apresentar compactabilidade inadequada. Essa proporção tem um impacto considerável no VAM de uma mistura, que aumentará com o decréscimo dessa proporção. Por fim, a proporção FAF dá uma ideia da compactabilidade dos agregados de menor tamanho da mistura. O VAM na mistura aumentará com o decréscimo dessa proporção (VAVRIK *et al.*, 2002a).

Essas proporções são importantes na avaliação e ajuste do VAM. Uma vez que uma graduação inicial de teste é avaliada no laboratório, outras graduações podem ser avaliadas numa planilha, a fim de escolher uma segunda tentativa que terá um VAM maior ou menor, de acordo com o desejado. Durante as análises, o projetista deve lembrar que mudanças na forma, resistência e textura dos agregados devem ser consideradas também (VAVRIK *et al.*, 2002a).

O método Bailey recomenda determinadas faixas de valores para cada proporção, visando assegurar o melhor intertravamento dos agregados, porém esses fatores podem ser ajustados com a finalidade de aumentar ou diminuir os vazios no agregado mineral e restringir a possibilidade de segregação da mistura. (FERNANDES JUNIOR *et al.*, 2004). As Tabela 12 e Tabela 13 mostram as faixas definidas pelo método Bailey para as frações AG, GAF e FAF de misturas com comportamento graúdo e fino, respectivamente.

Tabela 12: Valores recomendados para os parâmetros de proporção dos agregados em misturas de comportamento graúdo (VAVRIK *et al.*, 2002a)

Parâmetros	Tamanho Máximo Nominal (TMN), em mm					
	37,5	25	19	12,5	9,5	4,75
Proporção AG	0,80-0,95	0,70-0,85	0,60-0,75	0,50-0,65	0,40-0,55	0,30-0,45
Proporção GAF			0,35-0,50			
Proporção FAF			0,35-0,50			

Tabela 13: Valores recomendados para os parâmetros de proporção dos agregados em misturas de comportamento fino (VAVRIK *et al.*, 2002a)

Parâmetros	Tamanho Máximo Nominal (TMN), em mm					
	37,5	25	19	12,5	9,5	4,75
Proporção AG			0,60 - 1,00			
Proporção GAF			0,35 - 0,50			
Proporção FAF			0,35 - 0,50			

A mistura de agregados deve ser considerada de comportamento graúdo quando a porcentagem passante na PCP para um dado TMN for inferior aos valores indicados na Tabela 14, caso contrário, considera-se que a mistura tem comportamento fino (AASHTO M 323-13).

Tabela 14: Classificação de Comportamento de Misturas (AASHTO M 323-13)

Ponto de Controle PCP (mm) para Tamanho Nominal Máximo da Mistura (mm) (Porcentagem Passante)					
Tamanho Máximo Nominal (TMN)	37,5	25	19	12,5	9,5
Peneira de Controle Primário (PCP)	9,5	4,75	4,75	2,36	2,36
Ponto de controle PCP, % passante	47	40	47	39	47

Após a seleção da curva granulométrica e moldagem das amostras deve-se verificar se a mistura teve o comportamento (fino ou graúdo) inicialmente adotado. Caso esta análise apresente valores que classifiquem a mistura em condição diferente da pré-estabelecida, o procedimento todo deve ser refeito, levando em consideração o comportamento encontrado nesta análise (BUDNY, 2012).

3.2 LIGANTES ASFÁLTICOS E ADITIVO DE MISTURA MORNA

Foram utilizados nesta pesquisa, para efeito de comparação, dois tipos de ligantes asfálticos para a produção de duas misturas quentes e um aditivo surfactante combinado a cada um destes ligantes para a produção de duas misturas mornas. O aditivo de mistura morna utilizado foi o Rediset WMX, quanto aos ligantes, foram um CAP 30/45 convencional e um modificado 60/85.

O ligante convencional, CAP 30/45, proveniente da REDUC – Refinaria de Duque de Caxias, foi cedido pela Concessionária Rio Teresópolis (CRT). O asfalto modificado por polímero (AMP), BETUFLEX 60/85, foi cedido pela Stratura Asfaltos, não sendo fornecida a informação de qual tipo de polímero foi utilizado.

3.2.1 Aditivo de mistura morna

O aditivo Rediset® WMX-8017^a, a partir daqui chamado de aditivo WMA, foi cedido pelo Engenheiro Ângelo Giovani Ribeiro de Almeida, gerente regional de vendas da *AkzoNobel Asphalt Applications*. Trata-se de um aditivo *premium* para misturas quentes e mornas que permite uma redução nas temperaturas de mistura e compactação e que também proporciona um efeito *anti-stripping*. A Tabela 15 apresenta as características físicas do aditivo, conforme informações do fabricante.

Tabela 15: Características físicas do aditivo de mistura morna usado na pesquisa

Aparência a 25°C (77°F)	pastilhas marrons
Intervalo de fusão, °C	80-90 (176-194°F)
Densidade aparente (kg/m³)	0.55
Ponto de fulgor COC, °C	>238 (>460°F)

Na Tabela 16 estão indicadas as dosagens recomendadas pelo fabricante para diferentes fins. Adotou-se a percentagem de 2,0% de aditivo, tanto para a mistura com o CAP 30/45 quanto para a mistura com AMP 60/85, para obter uma melhor trabalhabilidade nas misturas mornas e para estar em concordância com a maioria dos trabalhos que utilizaram o mesmo aditivo, apresentados no Capítulo 2, viabilizando também comparações com resultados do trabalho de CAVALCANTI (2010). Salienta-se que nesta pesquisa será adotada a mesma quantidade de aditivo para o ligante convencional e modificado, devido aos motivos apresentados e para obter uma comparação direta, mas o fabricante recomenda uma quantidade menor para o ligante convencional quando o intuito é apenas a redução de temperatura.

Tabela 16: Dosagem do aditivo de mistura morna recomendada pelo fabricante

OBJETIVO	(%)
Melhorador de compactação	0,5 a 1,0
Mistura morna (asfalto convencional) redução de 30 °C	1 a 1,5
Mistura morna (asfalto com polímero e SMA) redução de 30°C	1,5 a 2,0
Melhora na trabalhabilidade para misturas espalhadas manualmente	2,0 a 3,0

% de aditivo por peso de ligante

Na Figura 5 ilustra-se a forma e tamanho de grãos do aditivo de mistura morna utilizado nesta pesquisa.



Figura 5: Forma e tamanho do aditivo Rediset WMX

3.2.2 Caracterização dos ligantes asfálticos puros e modificados

Os ensaios de caracterização dos quatro ligantes, puros e modificados, utilizados nas misturas foram feitos no Laboratório da Strutura Asfaltos e no Laboratório de Pavimentos da COPPE/UFRJ e estão descritos neste item.

A incorporação do aditivo de mistura morna foi feita utilizando um agitador mecânico de baixo cisalhamento do Laboratório de Pavimentos da COPPE/UFRJ, ilustrado na Figura 6. Aplicam-se movimentos giratórios por meio de uma hélice de 10cm de diâmetro na amostra de CAP contida num galão de 3,6 litros que é envolvido por uma manta térmica que mantém a temperatura desejada durante a agitação.

Para misturar o CAP 30/45 ao aditivo de mistura morna, foi seguido o mesmo procedimento adotado por CAVALCANTI (2010), que também incorporou 2% do mesmo aditivo em um CAP 30/45. Já para o AMP 60/85, estipulou-se uma temperatura de mistura um pouco mais alta devido à maior viscosidade do mesmo. Foi definido um tempo de 15min para se ter uma garantia de homogeneização, visto que este aditivo é de fácil mistura. Na Tabela 17 mostram-se os parâmetros utilizados para a modificação dos ligantes.

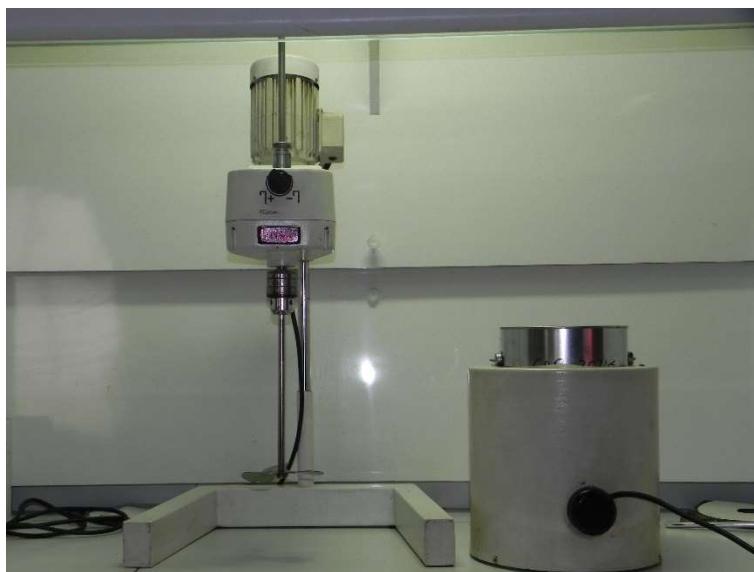


Figura 6: Agitador utilizado para a incorporação do aditivo Rediset WMX

Tabela 17: Parâmetros usados na incorporação do aditivo WMA nesta pesquisa

Ligante	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)	Rotação (RPM)
CAP 30/45 + 2,0% WMA	120	15	540
AMP 60/85 + 2,0% WMA	135		

O ensaio de estabilidade de estocagem foi realizado segundo a norma DNER-ME 384/99 para ligantes modificados por polímeros, que consiste na determinação do ponto de amolecimento do ligante após condicionamento. Tanto o ligante modificado AMP 60/85, quanto o CAP 30/45 e AMP 60/85 acrescidos do aditivo WMA foram ensaiados, e todos apresentaram boa estabilidade, com diferença máxima de apenas um 1°C entre o ponto de amolecimento do topo e da base. Essas especificações foram consideradas porque não há no Brasil especificações de ligantes modificados com esses tipos de aditivos de mistura morna. Na Figura 7 apresentam-se fotos do dispositivo utilizado no condicionamento com a finalidade de avaliar a estabilidade à estocagem.



Figura 7: Amostras utilizadas nos ensaios de estabilidade de estocagem nesta pesquisa

Fez-se uso do viscosímetro rotacional Brookfield da COPPE/UFRJ para caracterizar a viscosidade dos ligantes, seguindo os procedimentos preconizados na ABNT NBR 15184/04 e AASHTO T 316. A Figura 8 mostra as curvas de viscosidade dos quatro ligantes utilizados e na Tabela 18 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio. Também são indicadas nesta figura as faixas de temperatura de usinagem e de compactação, correspondentes aos intervalos de 150cP a 190cP e 250cP a 310cP, respectivamente, utilizadas para o CAP 30/45 e para a temperatura de usinagem do CAP 30/45 + 2% de aditivo WMA.

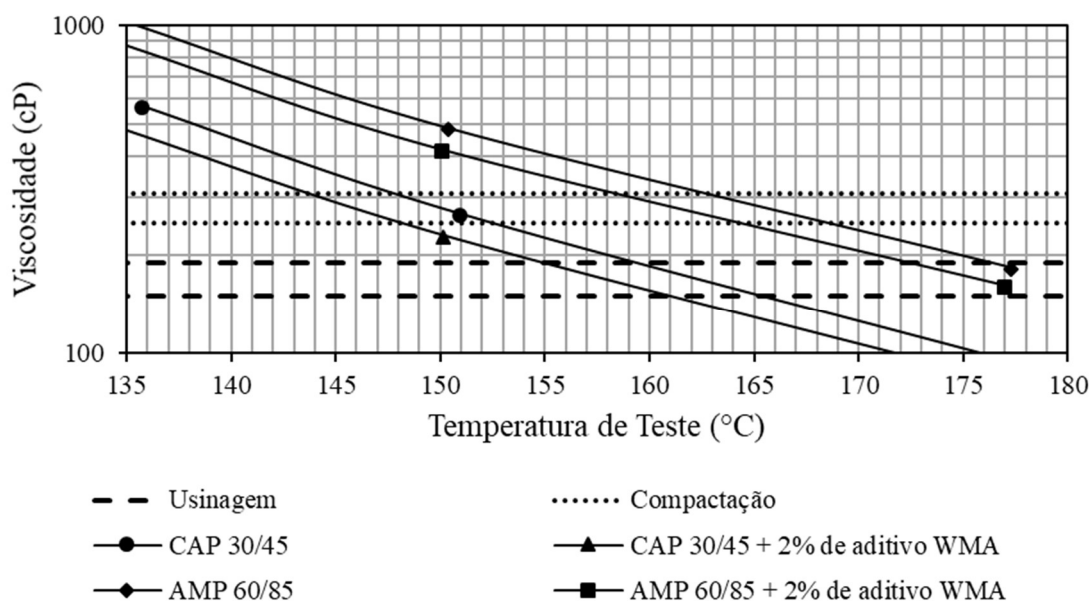


Figura 8: Curvas de viscosidade dos ligantes desta pesquisa

Os ligantes também foram submetidos ao envelhecimento em curto prazo. O envelhecimento foi realizado na estufa de película delgada rotacional (RTFOT) da COPPE/UFRJ seguindo as especificações da ABNT NBR 15235/09. Após envelhecimento pode-se então obter a caracterização convencional dos ligantes puros e modificados. Nas Tabela 18 e 19 estão agrupados os resultados dos ensaios de caracterização realizados nos ligantes puros e modificados, antes e após o envelhecimento de curto prazo.

Tabela 18: Caracterização dos ligantes desta pesquisa sem envelhecimento de curto prazo

Ligante	Ensaio de caracterização dos ligantes virgens					
	Penetração (dmm) 100g, 5s, 25°C	P.A. (°C)	Recuperação Elástica (%)	Viscosidade Brookfield (cP)		
				135°C	150°C	177°C
CAP 30/45	24,9	54,6	-	576	270	92
CAP 30/45 + 2,0% WMA	25,7	57,3	-	484	232	82
AMP 60/85	46,9	66,8	88	1022	494	185
AMP 60/85 + 2,0% WMA	43,1	74,9	82,5	879	423	163
Normas	DNIT - ME 155/10	DNIT - ME 131/10	DNIT - ME 130/10	ABNT NBR 15184		

Tabela 19: Caracterização dos ligantes desta pesquisa com envelhecimento de curto prazo

Ligante	Ensaio de caracterização após envelhecimento (RTFOT)						
	Penetração (dmm) 100g, 5s, 25°C	P.A. (°C)	Recuperação Elástica (%)	Perda (%)	Pen. Retida (%)	P.A. + (°C)	Rec. Elástica Retida (%)
CAP 30/45	17,3	59,3	-	0,09	69,5	4,7	-
CAP 30/45 + 2,0% WMA	15,8	62,4	-	0,13	61,5	5,1	-
AMP 60/85	30,9	72,5	85,5	0,12	65,9	5,7	97,2
AMP 60/85 + 2,0% WMA	28,1	77,4	80,5	0,10	65,2	2,5	97,6

A norma DNIT 095/2006 – EM fixa as características a serem adotadas para cimentos asfálticos de petróleo, isentos de aditivos para emprego direto em pavimentação. De acordo com esta norma o CAP 30/45 desta pesquisa encontra-se fora de especificação, pois apresentou uma penetração de 24,9 dmm, inferior ao limite mínimo de 30 dmm especificado. Os ligantes CAP 30/45 e CAP 30/45 + 2% WMA atenderam todos os critérios pós RTFOT de variação em massa máxima, inferior a 0,5%, variação máxima de ponto de amolecimento, inferior a 8°C, e penetração retida mínima, superior a 60%.

A norma DNIT 129/2011 - EM apresenta as características gerais e específicas para asfalto modificado por polímero elastomérico para emprego em pavimentação. O AMP 60/85 se enquadra nos limites de penetração, ponto de amolecimento e recuperação elástica especificados, porém em todas estas características ficou próximo dos valores mínimos especificados, 40dmm, 60°C e 85%, respectivamente. Os ligantes AMP 60/85 e AMP 60/85 + 2% WMA atenderam todos os critérios pós RTFOT de variação em massa máxima, inferior a 1,0%, variação máxima de ponto de amolecimento, inferior a 7°C, penetração retida mínima, superior a 60%, e percentagem de recuperação elástica original mínima, superior a 60%.

Observando os pequenos valores percentuais de perda de massa após envelhecimento de curto prazo e a proximidade dos valores obtidos de perda entre os ligantes puros e modificados com o aditivo WMA, percebe-se que o aditivo não apresenta comportamento volátil.

CAVALCANTI (2010) em sua pesquisa caracterizou um CAP 30/45 modificado com este mesmo aditivo WMA, como sendo mais moles do que o ligante puro, apresentando curvas de viscosidade ligeiramente inferiores, menos viscoso, penetração pouco maior e o ponto de amolecimento ligeiramente menor.

No caso da presente pesquisa, a característica das curvas de viscosidade se manteve para os dois ligantes modificados com WMA, entretanto, houve um aumento do ponto de amolecimento para ambos e uma redução da penetração do AMP 60/85 com o uso do aditivo WMA.

CAVALCANTI (2010) observou que embora o produto WMA tenha tornado o CAP 30/45 menos rígido quando da modificação, após o condicionamento no RTFOT o efeito foi inverso, tornando o ligante mais duro. Este mesmo comportamento foi observado para o CAP 30/45 utilizado na presente pesquisa.

O aditivo WMA acarretou em uma pequena perda de recuperação elástica no AMP 60/85, porém, como este ligante já estava com valor de recuperação elástica limítrofe ao mínimo exigido, esta redução fez com que ele ficasse fora de especificação.

Os ligantes foram classificados também em graus de temperatura máxima e mínima em que apresentam determinadas propriedades, estabelecidas como “grau de desempenho” (PG – *Performance Grade* em inglês). A classificação do Grau de Desempenho (PG) dos ligantes se deu seguindo recomendações da norma AASHTO M 332. As Tabelas 20, 21, 22 e 23 apresentam os resultados para cada critério avaliado na metodologia *Superpave* para classificação PG dos ligantes estudados, bem como as normas que especificam cada medição e as temperaturas de realização dos testes. Esses materiais foram analisados em três condições: virgem, envelhecidos no RTFOT e no RTFOT + PAV. O envelhecimento em laboratório utilizando os equipamentos RTFOT e PAV foi realizado seguindo os procedimentos AASHTO T 240 e AASHTO R 28, respectivamente, para representar as diferentes condições a que os materiais asfálticos são expostos durante a sua usinagem, aplicação em campo e durante a sua vida útil. Os ensaios de classificação foram realizados em dois equipamentos, o Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR - *Dynamic Shear Rheometer*) e o Reômetro de Fluência em Viga (BBR - *Bending Beam Rheometer*).

Tabela 20: Classificação PG do CAP 30/45 desta pesquisa

Classificação PG do ligante CAP 30/45				
Propriedade	Norma AASHTO	Temperatura de Teste (°C)	Critério	Medida
Ligante Original				
Ponto de Fulgor (°C)	T 48	-	> 230 °C	
Viscosímetro Rotacional				
Viscosidade Brookfield (cP)	T 316	135	< 3000 cP	576
DSR				
G* /sen(d) (kPa)	T 315	58	> 1.00 kPa	
		64		3,85
		70		1,70
		76		0,80
Ligante Envelhecido no Rolling Thin-Film Oven Test (RTFOT)				
DSR				
G* /sen(d) (kPa)	T 315	58	> 2.20 kPa	
		64		8,56
		70		3,62
		76		1,63
Variação de Massa (%)	T 240	-	< 1.0%	0,09%
MSCR - J _{nr 3.2}	M 332	64	S [2.0 < J _{nr 3.2} < 4.5] H [1.0 < J _{nr 3.2} < 2.0] V [0.5 < J _{nr;3,2} < 1.0] E [0.0 < J _{nr 3.2} < 0.5]	0,93
		70		2,87
		64	< 75.00%	2,67%
		70		3,08%
Ligante Envelhecido no RTFOT + Pressure Aging Vessel (PAV)				
DSR				
G* sen(d) (kPa)	T 315	25	< 5000 kPa	-
		28		-
		31		-
		34		-
BBR				
Módulo de rigidez (MPa)	T 313	-6	S < 300 MPa	144
		-12		347
		-18		479
Coeficiente angular	T 313	-6	m > 0,300	0,373
		-12		0,293
		-18		0,254
PG 70S-16 / PG 64V-16				

Tabela 21: Classificação PG do CAP 30/45 + 2% de aditivo WMA desta pesquisa

Classificação PG do ligante CAP 30/45 + 2% de aditivo WMA						
Propriedade	Norma AASHTO	Temperatura de Teste (°C)	Critério	Medida		
Ligante Original						
Ponto de Fulgor (°C)	T 48	-	> 230 °C			
Viscosímetro Rotacional						
Viscosidade Brookfield (cP)	T 316	135	< 3000 cP	484		
DSR						
G* /sen(d) (kPa)	T 315	58	> 1.00 kPa			
		64		3,79		
		70		1,69		
		76		0,80		
Ligante Envelhecido no Rolling Thin-Film Oven Test (RTFOT)						
DSR						
G* /sen(d) (kPa)	T 315	58	> 2.20 kPa			
		64		8,37		
		70		3,56		
		76		1,59		
Variação de Massa (%)	T 240	-	< 1.0%	0,13%		
MSCR - J _{nr 3.2}	M 332	64	S [2.0 < J _{nr 3.2} < 4.5] H [1.0 < J _{nr 3.2} < 2.0] V [0.5 < J _{nr;3,2} < 1.0] E [0.0 < J _{nr 3.2} < 0.5]	1,3		
		70		3,5		
		MSCR - J _{nr diff} (%)	M 332	64	< 75.00%	8,84%
				70		16,11%
Ligante Envelhecido no RTFOT + Pressure Aging Vessel (PAV)						
DSR						
G* sen(d) (kPa)	T 315	25	< 5000 kPa	-		
		28		-		
		31		-		
		34		-		
BBR						
Módulo de rigidez (MPa)	T 313	-6	S < 300 MPa	154		
		-12		366		
		-18		644		
Coeficiente angular	T 313	-6	m > 0,300	0,391		
		-12		0,305		
		-18		0,235		
PG 70S-16 / PG 64H-16						

Tabela 22: Classificação PG do AMP 60/85 desta pesquisa

Classificação PG do ligante AMP 60/85				
Propriedade	Norma AASHTO	Temperatura de Teste (°C)	Critério	Medida
Ligante Original				
Ponto de Fulgor (°C)	T 48	-	> 230 °C	
Viscosímetro Rotacional				
Viscosidade Brookfield (cP)	T 316	135	< 3000 cP	1022
DSR				
G* /sen(d) (kPa)	T 315	64	> 1.00 kPa	2,75
		70		1,60
		76		0,95
		82		0,58
Ligante Envelhecido no Rolling Thin-Film Oven Test (RTFOT)				
DSR				
G* /sen(d) (kPa)	T 315	64	> 2.20 kPa	5,38
		70		3,12
		76		1,87
		82		1,15
Variação de Massa (%)	T 240	-	< 1.0%	0,12%
MSCR - J _{nr 3.2}	M 332	64	S [2.0 < J _{nr 3.2} < 4.5] H [1.0 < J _{nr 3.2} < 2.0] V [0.5 < J _{nr;3,2} < 1.0] E [0.0 < J _{nr 3.2} < 0.5]	0,1
		70		0,3
		64	< 75.00%	0,42%
		70		3,81%
Ligante Envelhecido no RTFOT + Pressure Aging Vessel (PAV)				
DSR				
G* sen(d) (kPa)	T 315	25	< 5000 kPa	-
		28		-
		31		-
		34		-
BBR				
Módulo de rigidez (MPa)	T 313	-6	S < 300 MPa	64
		-12		119
		-18		442
Coeficiente angular	T 313	-6	m > 0,300	0,432
		-12		0,336
		-18		0,276
PG 70E-22				

Tabela 23: Classificação PG do AMP 60/85 + 2% de aditivo WMA desta pesquisa

Classificação PG do ligante AMP 60/85 + 2% de aditivo WMA				
Propriedade	Norma AASHTO	Temperatura de Teste (°C)	Critério	Medida
Ligante Original				
Ponto de Fulgor (°C)	T 48	-	> 230 °C	
Viscosímetro Rotacional				
Viscosidade Brookfield (cP)	T 316	135	< 3000 cP	879
DSR				
G* /sen(d) (kPa)	T 315	64	> 1.00 kPa	3,09
		70		1,78
		76		1,05
		82		0,63
Ligante Envelhecido no Rolling Thin-Film Oven Test (RTFOT)				
DSR				
G* /sen(d) (kPa)	T 315	64	> 2.20 kPa	4,66
		70		2,66
		76		1,55
		82		0,94
Variação de Massa (%)	T 240	-	< 1.0%	0,10%
MSCR - J _{nr 3.2}	M 332	64	S [2.0 < J _{nr 3.2} < 4.5] H [1.0 < J _{nr 3.2} < 2.0] V [0.5 < J _{nr;3,2} < 1.0] E [0.0 < J _{nr 3.2} < 0.5]	0,2
		70		0,5
		64	< 75.00%	10,24%
		70		44,92%
Ligante Envelhecido no RTFOT + Pressure Aging Vessel (PAV)				
DSR				
G* sen(d) (kPa)	T 315	25	< 5000 kPa	-
		28		-
		31		-
		34		-
BBR				
Módulo de rigidez (MPa)	T 313	-6	S < 300 MPa	67
		-12		130
		-18		343
Coeficiente angular	T 313	-6	m > 0,300	0,388
		-12		0,338
		-18		0,285
PG 70E-22				

De acordo com o fabricante do aditivo de mistura morna utilizado nesta pesquisa, uma das vantagens do mesmo é a não alteração do grau de desempenho (PG) dos ligantes. De fato, nos ligantes desta pesquisa, o grau de desempenho se manteve, tanto para a temperatura máxima quanto para a mínima. Porém, observa-se uma redução nos valores do parâmetro $|G^*|/\sin(d)$ e aumento do módulo de rigidez (S), que poderiam, eventualmente, acarretar em mudança da classificação PG, no caso da amostra pura se encontrar perto do limite especificado destes critérios, acarretando em uma diminuição da temperatura máxima e da temperatura mínima, o que não aconteceu para os ligantes estudados.

CAVALCANTI (2010) observou a mesma tendência: os resultados de DSR referentes ao CAP30/45 + WMA mostraram uma queda de rigidez significativa em comparação com o ligante CAP30/45 puro na condição sem envelhecimento. Ainda assim, o ligante continuou classificado como um PG70.

Tanto no CAP 30/45 quanto no AMP 60/85, observou-se um aumento na propriedade de compliância não recuperada (Jnr-3,2) obtida a partir do ensaio cíclico de Fluência e Recuperação sob Múltipla Tensão – MSCR, realizado no DSR. De acordo com MARTINS *et al.* (2009), este parâmetro permite diferenciar melhor o desempenho de asfaltos modificados dos não modificados, além de classificar os ligantes de acordo com o volume de tráfego.

De acordo com a classificação no parâmetro de compliância não recuperada a classificação PG irá ser adicionada da letra S, H, V ou E, que se referem a um tráfego padrão, pesado, muito pesado e extra pesado, respectivamente. Pelo fato do CAP 30/45 ter sido classificado com S na sua temperatura alta de PG, a classificação foi feita também para um grau abaixo, indicando que em temperatura menos elevadas aceita-se um nível maior de tráfego. Para uma temperatura máxima de 64°C no pavimento, o CAP 30/45 puro atende um tráfego muito pesado e o CAP 30/45 + 2% WMA atende um tráfego pesado, indicando influência do aditivo WMA na classificação. Os AMP 60/85, puro e modificado foram classificados como E, tráfego extra pesado, indicando um melhor desempenho deste ligante na deformação permanente do que o CAP 30/45.

3.3 DOSAGEM DE MISTURAS

Nesta pesquisa foram produzidas duas misturas asfálticas mornas preparadas com o aditivo WMA, denominadas a partir daqui de WMA1 e WMA2, para comparação com suas respectivas misturas asfálticas quentes, HMA1 e HMA2, totalizando quatro misturas. A nomenclatura utilizada se baseia naquela amplamente empregada no âmbito internacional para misturas mornas (WMA – *Warm Mix Asphalt*) e misturas quentes (HMA – *Hot Mix Asphalt*).

É importante ressaltar que a única variação das misturas mornas para suas respectivas misturas quentes é a utilização do aditivo e a redução das temperaturas dos agregados e de compactação da mistura. As misturas são diferentes somente no que se refere ao ligante utilizado: as misturas 1 foram produzidas utilizando ligante convencional CAP 30/45, já as misturas 2 foram produzidas utilizando ligante modificado AMP 60/85. Na Tabela 24 está apresentado um resumo das misturas asfálticas que foram avaliadas nesta dissertação.

Tabela 24: Resumo das características das misturas asfálticas desta pesquisa

Mistura asfáltica	Aditivo para mistura morna	Ligante asfáltico	Origem dos agregados (pedreira)	Distribuição granulométrica	TMN* da mistura (mm)
HMA1	-	CAP 30/45	Magé -RJ	Faixa B	19
WMA1	2% de aditivo WMA				
HMA2	-	AMP 60/85			
WMA2	2% de aditivo WMA				

*TMN = tamanho máximo nominal

Conforme descrito no item 3.2, as temperaturas de usinagem e compactação da mistura HMA1 (CAP 30/45) foram definidas nos intervalos normatizados de viscosidade. As temperaturas de usinagem e compactação da mistura HMA2 (AMP 60/85) foram indicadas pelo fornecedor, por se tratar de um ligante modificado.

De acordo com DNIT 031/2006 - ES, os agregados devem ser aquecidos a temperaturas de 10°C a 15°C acima da temperatura do ligante asfáltico, sem ultrapassar 177°C. Para as duas misturas quentes, HMA1 e HMA2, definiu-se a temperatura de agregado 10°C acima da temperatura de usinagem, devido à alta temperatura de usinagem do ligante modificado.

É importante lembrar que, por ser surfactante, o efeito do aditivo, utilizado nas misturas mornas, na curva de viscosidade é pequeno, visto que este tipo melhora a trabalhabilidade da mistura através da redução da tensão superficial do ligante e não da viscosidade. Para a mistura WMA1 (CAP 30/45 + 2% de aditivo WMA), esta pequena redução foi considerada na temperatura de usinagem (-5°C) e para a mistura WMA2 (AMP 60/85 + 2% de aditivo WMA) foi mantida a mesma temperatura indicada pelo fabricante para a mistura quente, por não se saber qual foi o parâmetro por eles adotado para definir as temperaturas.

Observando a Tabela 25 percebe-se que as temperaturas de usinagem das misturas a quente para o ligante convencional e modificado ficaram próximas, sendo a temperatura de usinagem do ligante modificado, HMA2, 5°C superior à do convencional, HMA1. Já a temperatura de compactação da mistura quente com ligante modificado é inferior à da mistura quente com ligante convencional em 2°C. Considerando a diferença de viscosidade entre os ligantes, acredita-se que a temperatura indicada pelo fabricante do ligante modificado possa estar abaixo do ideal. Entretanto, na falta de um método para determinação destas temperaturas com uso de ligantes modificados, as temperaturas indicadas pelo fabricante foram mantidas.

A temperatura dos agregados e de compactação das misturas mornas, WMA1 e WMA2, foi reduzida de 30°C em relação às suas respectivas misturas quentes, seguindo recomendações do fornecedor do aditivo WMA. Em sua tese, MOTTA (2011) constata que a diminuição de temperatura dos agregados em cerca de 30°C com o uso de aditivo surfactante foi adequada para tecnologia de mistura morna por ela utilizada.

A Tabela 25 apresenta as características básicas das diferentes misturas utilizadas nesta pesquisa, destacando as temperaturas dos agregados, de usinagem dos ligantes e de compactação dos corpos de prova para todas as misturas.

Tabela 25: Temperaturas dos agregados, usinagem e de compactação das misturas desta pesquisa

Mistura asfáltica	Aditivo para mistura morna	Ligante asfáltico	Temperatura (°C)		
			Agregado	Ligante	Compactação
HMA1	-	CAP 30/45	173	163	151
WMA1	2% de aditivo WMA		143	158	121
HMA2	-	AMP 60/85	179	169	148
WMA2	2% de aditivo WMA		149	169	118

A dosagem foi realizada utilizando os critérios *Superpave*, sendo suprimidas as fases de compactação para determinação do teor tentativa e a de escolha da granulometria, visto que já havia uma granulometria definida. A confecção dos corpos de prova para dosagem foi realizada a partir de 5 teores de ligante, variando de 4,0 a 6,0%, em intervalos de 0,5%.

A mistura HMA1 foi escolhida como mistura referência para a dosagem, o teor de projeto encontrado para esta mistura foi adotado para as outras três. Foram adotados os mesmos teores de ligante e as mesmas composições granulométricas para todas as misturas, com o intuito de isolar da análise do comportamento das mesmas este fator, para fins de comparação.

Julga-se tal definição adequada, visto que em estudos anteriores do CENPES misturas com os mesmos agregados e diferentes ligantes (modificados ou não, com exceção do asfalto borracha) foram dosadas segundo a mesma metodologia, obtendo teores de ligante de projeto muito próximos, com variação inferior a $\pm 0,2\%$ em relação ao valor médio (NASCIMENTO *et al.*, 2014). Além disto, de acordo com MOTTA (2011), o teor de ligante de projeto das misturas mornas deve ser mantido igual à da mistura similar a quente.

De acordo com um estudo norte-americano realizado pelo *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) e relatado no Report 691 (BONAQUIST, 2011), uma das maiores conclusões obtidas a partir da pesquisa realizada sob o Projeto NCHRP 09-43, relatada neste *Report*, foi que as propriedades volumétricas de misturas WMA e HMA projetadas adequadamente são muito semelhantes. Esta conclusão apoia a prática atual de adotar um processo WMA em um projeto de mistura de HMA aprovado sem refazer toda a dosagem. No entanto, a compactabilidade, o dano à umidade e a resistência à deformação permanente do WMA podem ser significativamente diferentes daquelas do HMA. Cada um deles é avaliado diretamente no método recomendado de projeto de mistura WMA, especificados na AASHTO R 35.

Foi utilizado para a execução das misturas um misturador francês modelo BBMAX80 do Laboratório de Pavimentos da COPPE/UFRJ, o qual foi programado para operar, na temperatura de mistura, por um tempo de 2 minutos.

Após a mistura foram pesados em embalagens de alumínio descartáveis 1200 gramas de massa por embalagem, para a moldagem de quatro corpos de prova para cada teor, três para moldagem no número de giros de projeto e um no número de giros máximo por teor. Posteriormente, foram condicionados durante 2 horas em estufa, na temperatura de compactação, previamente à sua moldagem, de acordo com o procedimento AASHTO R 30-02. Este condicionamento de curto prazo serve para simular os efeitos do envelhecimento da mistura e da absorção de ligante que ocorre durante a fase de pré-compactação do processo de construção.

A moldagem dos corpos de prova foi executada utilizando-se o compactador giratório IPC Servopac com sistema de carga eletro-pneumático. O Número de giros de projeto inicialmente adotado (N_{proj}) foi de 100 e a dosagem foi realizada seguindo recomendações da norma AASHTO M 323-13. De acordo com a especificação AASHTO R 35-15, este N_{proj} é aplicado para tráfegos de médio a pesado, em rodovias urbanas, intermunicipais e interestaduais, com número de giros inicial (N_{ini}) de 8 giros e máximo (N_{max}) de 160 giros, e representa um tráfego equivalente a carga de eixo simples (ESAL) entre 3×10^6 e 3×10^7 no padrão americano AASHTO.

Na norma brasileira, DNIT 178/2018 – PRO, este N_{proj} de 100 giros corresponde à um volume de tráfego comercial pesado. A Tabela 26 apresenta os critérios de compactação usando o compactador giratório *Superpave* de acordo com o projeto de normativa brasileiro.

Tabela 26: Critérios de compactação usando o compactador giratório *Superpave* (DNIT 178/2018 – PRO)

Volume de tráfego comercial	Parâmetros de compactação		
	Número de giros		
	$N_{inicial}$	$N_{projeto}$	$N_{máximo}$
Muito baixo	6	50	75
Médio	7	75	115
Pesado	8	100	160
Muito pesado	9	125	205

O molde utilizado para compactação dos corpos de prova foi o de 100mm diâmetro, por ser procedimento padrão no Laboratório de Pavimentos da COPPE e utilizar menos material, porém a escolha do molde a ser utilizado é um ponto de discordância entre pesquisadores. O molde de diâmetro de 150 mm é o recomendado pela AASHTO R 35-15 e por alguns pesquisadores. No entanto, JACKSON e CZOR (2003) afirmaram que misturas de até 25,4 mm de TMN não mostram diferença significativa nos valores de compactação quando comparados corpos de prova moldados nos moldes de 100 mm e 150 mm de diâmetro e citam três fatores que os levaram a optar pelo molde de diâmetro de 100 mm:

- O tamanho da amostra é bastante reduzido.
- É possível realizar ensaios convencionais de laboratório com amostras de 100 mm de diâmetro.
- A maioria das misturas asfálticas é feita com agregados de $TMN \leq 25,4\text{mm}$.

A densidade específica aparente (G_{mb}) dos corpos de prova foi determinada segundo NBR 15573/12. A determinação da densidade específica máxima da mistura (G_{mm}) foi feita segundo NBR 15619/16 (método de Rice), sendo determinado em um dos teores intermediários utilizados na dosagem. Assim, com o valor da G_{mm} , o teor de ligante (P_b) e da densidade do ligante asfáltico (G_b) pôde-se obter o valor da densidade específica efetiva dos agregados (G_{se}), que foi utilizada para o cálculo da G_{mm} dos corpos de prova com outros teores.

Com as propriedades físicas dos agregados e da mistura asfáltica, foram calculados os seguintes parâmetros volumétricos dos corpos de prova: porcentagem de vazios com ar (V_a), vazios no agregado mineral (V_{AM}), relação betume-vazios (RBV), relação pó-betume efetivo (R_{PB}) e porcentagem da densidade máxima da mistura ($\%G_{mm}$) no N_{ini} e no N_{max} . Estes cálculos seguiram as recomendações do INSTITUTO DO ASFALTO (2001).

Os valores médios das propriedades volumétricas dos corpos de prova de mesmo teor foram processados estatisticamente, sendo utilizados para a montagem das curvas de dosagem e determinação do teor de ligante de projeto. Na Tabela 27 estão os requisitos da dosagem com o compactador giratório, segundo AASHTO M 323-13.

Tabela 27: Requisitos de dosagem AASHTO M 323-13

ESALs milhões	Densidade relativa requerida (% Gmm)			Vazios do Agregado Mineral (VAM) % mínima						Relação Betume Vazios (RBV), %	Relação Pó- Betume (RPB)
				Tamanho Máximo Nominal (TMN), mm							
	Nini	Nproj	Nmáx	38	25	19	13	9,5	4,8		
	< 0,3	<91,5	96	<98	11	12	13	14	15		
0,3 a < 3	<90,5	96	<98	11	12	13	14	15	16	65 a 78	0,6 a 1,2
3 a < 10	<89,0	96	<98	11	12	13	14	15	16	65 a 75	0,6 a 1,2
10 a <30	<89,0	96	<98	11	12	13	14	15	16	65 a 75	0,6 a 1,2
>30	<89,0	96	<98	11	12	13	14	15	16	65 a 75	0,6 a 1,2

ESALs - Tráfego equivalente a carga de eixo simples (80 kN) pelos critérios AASHTO.

Os ensaios de dosagem da HMA1 foram realizados seguindo os procedimentos citados, para o Nproj de 100 giros, resultando em um teor ótimo de ligante de 4,3%. No entanto, a dosagem neste teor apresentou um VAM baixo, com percentagem igual a mínima exigida por norma. Por este motivo, optou-se pela regressão dos dados das curvas de compactação para um Nproj de 75 giros, obtendo os parâmetros de dosagem para esta condição, que corresponde à um tráfego médio no projeto de normativa brasileira, de acordo com a Tabela 26. Ressalta-se que em uma condição de projeto para campo o N de projeto deve ser mantido e a mistura reajustada, mas devido as limitações de tempo e material desta pesquisa optou-se por estimar a dosagem para um N inferior que atendesse melhor os parâmetros de dosagem.

Segundo a especificação AASHTO R 35-15, o Nproj de 75 giros é aplicado para estradas coletoras ou ruas de acesso, ruas urbanas de tráfego médio e a maioria das estradas municipais, com Nini de 7 giros e Nmax de 115 giros, e representa um tráfego equivalente a carga de eixo simples (ESAL) entre 3×10^5 e 3×10^6 . Para o N expresso pelos fatores de equivalência do método tradicional de dimensionamento brasileiro, conhecidos como fatores do Corpo de Engenheiros, estes valores seriam aproximadamente entre 10^6 e 10^7 .

O teor ótimo de ligante resultante do Nproj de 75 giros foi de 4,6%, atendendo todos os requisitos de dosagem e resultando em um aumento do VAM, sendo este o teor adotado para as misturas desta pesquisa. A Figura 9 apresenta os gráficos contendo os parâmetros de dosagem, onde as linhas verticais representam o teor ótimo e as linhas tracejadas horizontais representam os limites a serem atendidos.

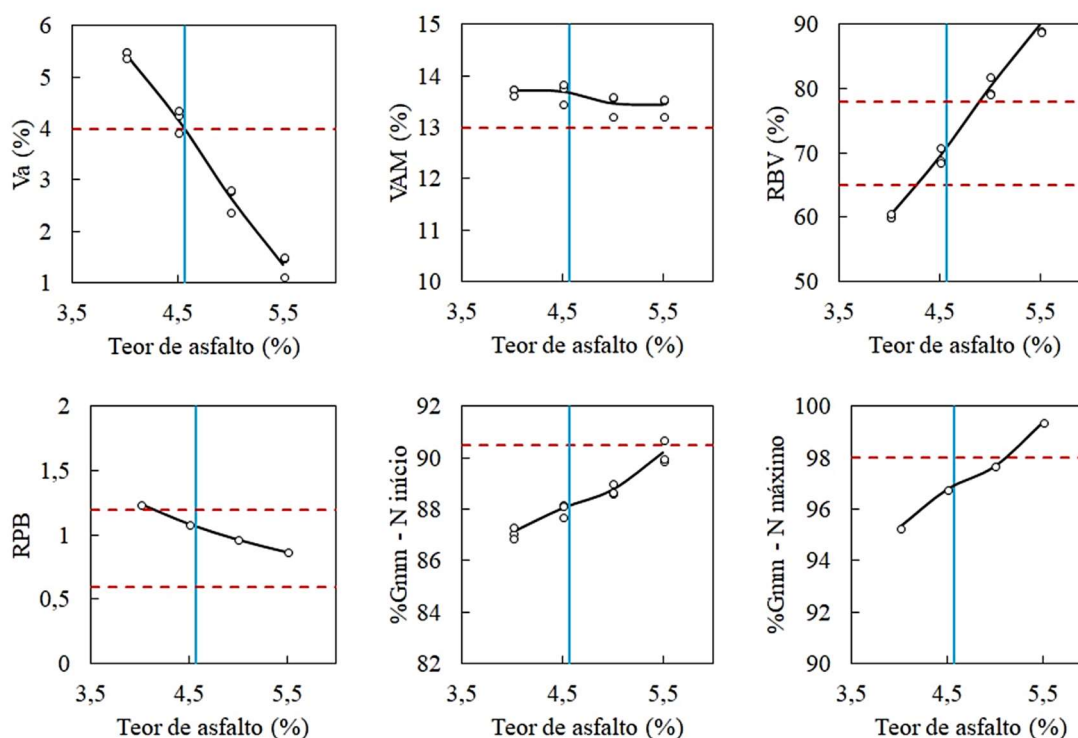


Figura 9: Parâmetros obtidos na dosagem da mistura HMA1 desta pesquisa

3.3.1 1Parâmetros volumétricos das misturas estudadas

Posteriormente à definição do teor de projeto a ser utilizado nas misturas deste trabalho, definido a partir da mistura HMA1 de referência, procedeu-se a moldagens para conferência do atendimento dos parâmetros volumétricos em cada uma das quatro misturas. Também foi obtida a densidade máxima (Gmm) de cada uma das misturas, que foi utilizada no cálculo dos vazios de todos os corpos de provas moldados posteriormente para os ensaios mecânicos. Seguindo recomendações da AASHTO R 35-15, o condicionamento de curto prazo também foi realizado para as duas misturas mornas. A Tabela 28 apresenta os dados e parâmetros das misturas.

Tabela 28: Dados de características e parâmetros das misturas desta pesquisa

Mistura	Gb	Gmm	Va (%)	VAM (%)	RBV (%)	RPB	% Gmm	
							Nini	Nmax
HMA1	1,050	2,628	3,5	13,2	73,8	1,07	88,2	97,0
WMA1	1,046	2,622	3,6	13,5	73,1	1,06	87,3	97,4
HMA2	1,004	2,618	4,0	14,0	71,4	1,08	87,7	96,9
WMA2	0,995	2,611	3,0	13,4	77,3	1,07	87,6	97,3
Critério	-	-	4	> 13	65 a 78	0,6 a 1,2	< 90,5	< 98

Analisando os resultados apresentados na tabela, observa-se a coerência apresentada entre as densidades dos ligantes em relação às densidades máximas medidas de suas respectivas misturas, onde ligantes com densidades menores apresentaram Gmm inferiores também. Sabe-se que a densidade do aditivo de mistura morna é inferior à dos ligantes utilizados, conforme dado do fornecedor, o que se mostrou coerente uma vez que os ligantes com aditivo de mistura morna apresentaram valores de densidade levemente inferiores aos seus respectivos ligantes virgens.

A mistura HMA1 que foi utilizada com referência na dosagem, apresentou vazios de projeto 0,5% inferior aos 4,0% para o qual foi projetada, isso pode ser devido ao fato da dosagem ter sido realizada para um Nproj de 100 giros e depois foi estimado o teor para o Nproj de 75 giros, que foi o adotado, através de cálculos a partir das curvas de densificação geradas pelo compactador giratório. A mistura WMA2 apresentou vazios de ar 1,0% inferior aos 4%, isto se deve a melhora na trabalhabilidade da mistura conferida pelo aditivo de mistura morna, que resultará em menos passagens do rolo compactador em campo para atingir os vazios necessários. A quantidade maior de vazios de ar na HMA2 em relação a HMA1, mistura de referência na dosagem, pode ser indício de que as temperaturas indicadas pelo fabricante do AMP 60/85 foram um pouco baixas.

As misturas foram aceitas mesmo apresentando estas variações em relação aos vazios de ar no N de projeto, visto que estes se enquadram entre 3% e 5%, intervalo aceito por muitos DOT (Departamento de Transportes). A variação entre os vazios de ar no N de projeto também pode ser explicada pelo fato de se ter adotado o mesmo teor de ligante para todas as misturas, pelas temperaturas de usinagem e compactação do ligante modificado indicadas pelo fabricante (aparentemente baixas) e pelos efeitos do aditivo de mistura morna.

3.3.2 Avaliação das misturas WMA

O NCHRP realizou um projeto denominado “*Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt*”, relatado no *Report 691* (BONAQUIST, 2011), com o objetivo de desenvolver uma metodologia de dosagem de misturas mornas. Este estudo resultou em um documento que é uma espécie de rascunho do que veio a ser adicionado como apêndice à norma AASHTO R 35, que trata da dosagem volumétrica *Superpave* de misturas a quente, sob a denominação “*Special Mixture Design Considerations and Practices for Warm Mix Asphalt (WMA)*”.

Este apêndice apresenta considerações especiais de projeto de mistura e métodos para projetar misturas asfálticas mornas (WMA) usando a norma AASHTO R 35. O objetivo da WMA é produzir misturas com resistência, durabilidade e características de desempenho equivalentes às da HMA, utilizando temperaturas de produção substancialmente reduzidas (AASHTO R 35-15).

Essas considerações especiais de projeto de misturas e práticas são aplicáveis sempre que uma tecnologia WMA estiver sendo usada. As tecnologias WMA podem ser usadas como auxiliares de recobrimento e compactação, sem necessariamente reduzir a temperatura de produção em 30° C. As práticas neste apêndice são aplicáveis a uma ampla gama de tecnologias WMA, incluindo:

- aditivos WMA que são adicionados ao ligante asfáltico (caso do REDISSET),
- aditivos WMA que são adicionados à mistura durante a produção,
- misturas com agregados úmidos, e
- processos de espumação em usinas.

Este apêndice inclui seções abordando os seguintes aspectos do projeto da mistura WMA:

- equipamento de laboratório adicional;
- seleção de tecnologia WMA;
- seleção de grau de desempenho (PG);
- RAP em WMA;
- procedimentos de fabricação de corpos de prova (CPs) específicos da tecnologia;
- avaliações de misturas WMA;
- ajuste da mistura para atender aos requisitos da especificação.

Neste item será feito o estudo do aspecto referente aos critérios de avaliação de misturas WMA, de acordo com a AASHTO R 35-15, que se dividem em: recobrimento, compatibilidade, avaliação da sensibilidade à umidade e avaliação da resistência a deformação permanente. A avaliação dos critérios é feita na mistura morna em seu teor ótimo de ligante. Optou-se por realizar a análise em apenas uma das misturas mornas, por serem produzidas com o mesmo aditivo. A mistura WMA2 foi a escolhida para ser avaliada de acordo com estes critérios, por representar a situação menos favorável nos critérios de recobrimento e compatibilidade. As descrições dos procedimentos de avaliação e análises da mistura WMA2 referente aos mesmos constam nos itens a seguir.

3.3.2.1 Recobrimento da mistura (coating)

Para a realização desta análise, deve-se preparar uma quantidade suficiente de mistura, no teor de projeto, para realizar o procedimento de avaliação do recobrimento de acordo com a AASHTO T 195, usando o procedimento de fabricação de WMA apropriado. A mistura não deve ser condicionada à curto prazo para esta análise. O critério de revestimento recomendado é de pelo menos 95 por cento das partículas de agregado gráudo sendo totalmente revestidas.

A avaliação do recobrimento foi realizada de acordo com a especificação AASHTO T 195-11 e foi obtido um percentual de recobrimento de 98,1%, atendendo o critério de avaliação de WMA da AASHTO R 35-15. Na Figura 10, pode-se observar alguns agregados gráudos utilizados nesta análise, bem como o recobrimento dos mesmos.



Figura 10: Recobrimento dos agregados gráudos da WMA2 desta pesquisa

3.3.2.2 Compactabilidade da mistura

Para a realização desta análise, deve-se preparar uma quantidade suficiente de mistura, no teor de projeto, para moldar quatro amostras no compactador giratório e uma para medição de densidade específica máxima usando o procedimento de fabricação de WMA apropriado, incluindo o condicionamento à curto prazo por $2 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$ na temperatura de compactação de campo planejada.

Deve-se determinar a densidade específica máxima teórica (Gmm) da mistura. Então, moldar no compactador giratório corpos de prova em duplicata, para os giros de N_{proj} , na temperatura de compactação de campo planejada e 30°C abaixo desta temperatura. Determinar a densidade aparente (Gmb) de cada amostra, lembrando que deve ser feita a correção do valor do Gmb dos CPs para todos os giros em função do valor real medido, e calcular a %Gmm para cada giro em cada uma das amostras.

Para cada amostra, deve-se determinar o número de giros necessários para atingir 92% Gmm. Então, determinar o número médio de giros necessários para atingir 92% de densidade relativa nos dois CPs na temperatura de compactação planejada no campo e nos dois CPs compactados com temperatura 30°C abaixo da temperatura de compactação. Posteriormente deve-se calcular a relação entre os giros médios, a partir da Equação 04.

$$\text{Relação de giros} = \frac{(N_{92})_{T-30}}{(N_{92})_T} \quad (04)$$

Onde:

$(N_{92})_{T-30}$: número de giros necessários para atingir 92% do Gmm à temperatura de 30°C inferior a temperatura de compactação planejada da mistura morna;

$(N_{92})_T$: número de giros necessários para atingir 92% do Gmm à temperatura de compactação planejada da mistura morna;

O critério de compatibilidade recomendado é uma razão de giros menor ou igual a 1,25. A mistura WMA2 analisada resultou em uma razão de 1,20, atendendo este critério.

3.3.2.3 Avaliação da sensibilidade à umidade

Para a realização desta análise, deve-se preparar uma quantidade suficiente de mistura, no teor de projeto, para moldar seis amostras no compactador giratório usando o procedimento de fabricação de WMA apropriado, incluindo o condicionamento à curto prazo por $2\text{ h} \pm 5\text{ min}$ na temperatura planejada de compactação do campo. Os corpos de prova devem ser compactados para $7,0 \pm 0,5\%$ de vazios de ar. A avaliação das amostras deve ser feita de acordo com a AASHTO T 283. O critério de sensibilidade à umidade recomendado é uma relação de resistência retida à tração superior a 0,80 e nenhuma evidência visual de *stripping*. Este procedimento encontra-se descrito de forma mais completa no item 3.6.1 e as duas misturas WMA atenderam ao critério. Os resultados serão apresentados posteriormente no item 4.3.1.

3.3.2.4 Avaliação resistência à deformação permanente

Para a realização desta análise, deve-se preparar uma quantidade suficiente de mistura, no teor de projeto, para moldar quatro amostras no compactador giratório para o ensaio de *Flow Number* (FN), usando o procedimento de fabricação de WMA apropriado, incluindo o condicionamento à curto prazo por $2\text{ h} \pm 5\text{ min}$ na temperatura planejada de compactação do campo. A AASHTO R 35 recomenda as normas americanas para análise do FN, no entanto, as misturas mornas deste trabalho foram avaliadas quanto ao FN para atender os critérios de execução e análise do projeto de norma brasileira, descrito em mais detalhes no item 3.6.4. As duas misturas mornas atenderam aos critérios mínimos para este ensaio de acordo com a normativa brasileira e os resultados serão apresentados posteriormente no item 4.3.4.

3.4 ÍNDICES DE COMPACTAÇÃO GIRATÓRIA

Uma limitação da metodologia básica de dosagem *Superpave* é considerar apenas parâmetros volumétricos como critérios de dosagem, enquanto as propriedades mecânicas são as que se relacionam diretamente com o desempenho do pavimento. Uma vez que o compactador giratório se tornou o componente principal desta metodologia de dosagem, é desejável a sua utilização para a obtenção de propriedades mecânicas de misturas asfálticas. Vários trabalhos têm sido feitos para estabelecer parâmetros a partir dos dados oriundos da compactação giratória, para que possam servir de suplemento à dosagem convencional puramente volumétrica (MAHMOUD e BAHIA, 2004).

Outro problema com a dosagem *Superpave* está ligado aos aspectos construtivos. A experiência de campo indica que algumas misturas são difíceis de compactar e requerem compactação ou equipamentos adicionais. De fato, os requisitos de compactação são os tradicionais, ou seja, geralmente sendo utilizado um grau de compactação equivalente à obtenção de 92% da Gmm (ou 8% de vazios) durante a implantação da camada, supondo-se que haverá sobre-compactação com o tráfego (NASCIMENTO, 2008).

Assim, foram propostos alguns índices oriundos das curvas de compactação giratória, tais como o *Compaction Densification Index* (CDI) e *Traffic Densification Index* (TDI), utilizados por MAHMOUD e BAHIA (2004), descritos a seguir, para melhor avaliar a mistura durante a dosagem.

3.4.1 *Compaction Densification Index* (CDI)

É geralmente aceito que, quando o pavimento está sendo construído no campo, que a vibro-acabadora aplica um certo esforço preliminar de compactação no revestimento durante o processo de colocação da mistura. Este esforço de compactação inicial é simulado pela compactação aplicada pelo compactador giratório antes de atingir o N inicial. Além desta compactação inicial, os empreiteiros americanos são requeridos a reduzir os vazios de ar usando rolos até o revestimento atingir no mínimo, aproximadamente 92% Gmm (8% de vazios de ar), neste ponto a estrada será aberta ao tráfego (MAHMOUD e BAHIA, 2004).

O CDI, que é o valor da área sob a curva de densificação a partir da densidade referente ao N inicial até a densidade de 92% da Gmm, representa o trabalho realizado durante o período de construção para alcançar 8% de vazios de ar.

3.4.2 *Traffic Densification Index* (TDI)

A partir da abertura para o tráfego, pode haver aumento da densificação do revestimento ao longo da sua vida útil. Para garantir que a mistura ainda disponha de vazios de ar até o final de sua vida útil, é preciso garantir que, durante sua compactação giratória, para o número de giros final, a mistura atinja no Nmax menos que 98% Gmm (2% de vazios de ar), o que é considerada a densidade terminal. Se a pós-compactação passar deste ponto, o revestimento pode ficar propenso a um rápido acúmulo de deformações permanentes.

O TDI, que é o valor da área sob a curva de densificação de 92% para 98% da Gmm, representa o trabalho necessário para resistir às cargas de tráfego durante a vida útil do pavimento, sem ter escoamento da massa ou excesso de deformação permanente (MAHMOUD e BAHIA, 2004).

3.4.3 Processamento das curvas de densificação e cálculo do CDI e TDI

Durante a moldagem dos corpos de prova (CPs) no compactador giratório, são registrados no sistema de aquisição automática de dados a cada giro, a tensão vertical, o ângulo de giro aplicado e a altura da amostra. Assim, para cada corpo de prova oriundo do compactador giratório é gerado um arquivo com o histórico do processo de compactação, utilizado para calcular a altura do CP a cada giro. A partir desta altura, e juntamente com a massa do material, pode-se determinar o volume do CP, permitindo estimar a densidade da amostra ao longo do processo de compactação, de acordo com Equação 05.

$$Gmb(estimada) = \frac{Wm/Vmx}{\gamma_w} \quad (05)$$

Onde:

Gmb (estimada) = densidade específica aparente estimada durante a compactação;

Wm = massa do CP (g);

γ_w = massa específica da água;

Vmx = Volume do CP calculado a partir do diâmetro interno do molde e a altura medida pelo compactador giratório em um determinado giro.

Este cálculo admite uma forma cilíndrica perfeita para o corpo de prova, o que não é verdade, uma vez que as irregularidades superficiais levam a um volume levemente inferior ao considerado no cálculo. Por este motivo, a densidade estimada é corrigida pela relação entre a densidade medida por pesagem hidrostática, obtida de acordo com a NBR 15573/12, e a densidade estimada no N referente ao final da compactação. Esta relação é conhecida como fator de correção (C), dado pela Equação 06.

$$C = \frac{Gmb(medida)}{Gmb(estimada)} \quad (06)$$

Onde:

C = fator de correção;

Gmb (medida) = densidade específica aparente medida;

Gmb (estimada) = densidade específica aparente estimada ao final da compactação.

Após calcular o fator de correção correspondente ao final da compactação, o mesmo é aplicado para corrigir o Gmb (estimado) nos outros giros, calculando-se desta forma a densidade corrigida em qualquer momento do processo de compactação, de acordo com a Equação 07.

$$Gmb(corrigida) = C \times Gmb(estimada) \quad (07)$$

Com a correção do valor da densidade, é possível calcular a porcentagem da Gmm (%Gmm) para todos os giros da compactação usando a Equação 08.

$$\%Gmm = 100 \times \frac{Gmb(corrigida)}{Gmm} \quad (08)$$

Após a determinação da %Gmm para todos os giros do processo de compactação, plota-se a mesma em função do número de giros, gerando a curva de densificação do CP. Neste trabalho, assim como no de NASCIMENTO (2008), os cálculos foram processados em planilhas eletrônicas do Microsoft Excel. Na Figura 11 ilustra-se uma curva de densificação típica de um corpo de prova moldado no compactador giratório durante esta pesquisa.

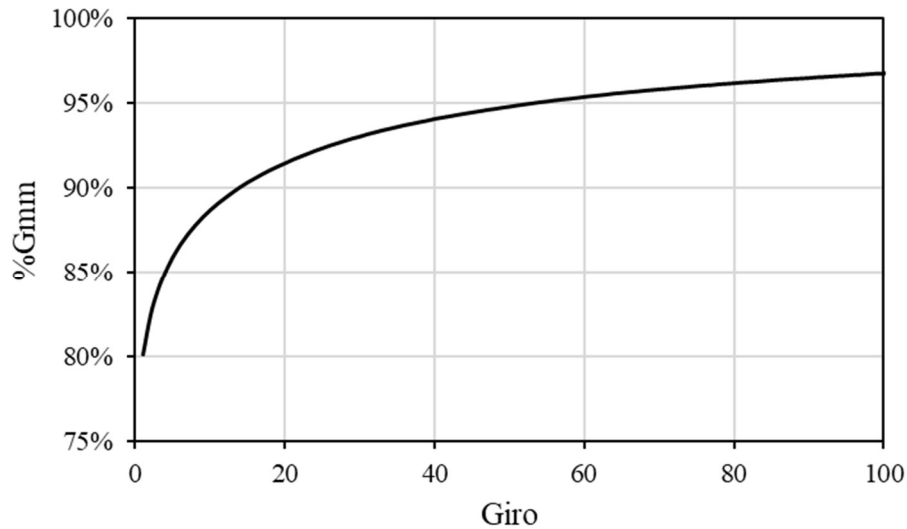


Figura 11: Curva de densificação típica de uma mistura asfáltica no compactador giratório

A partir das curvas de densificação dos CPs, foram calculados os índices CDI e TDI. Os índices CDI e TDI foram calculados segundo a definição de MAHMOUD e BAHIA (2004), que requer a determinação de áreas sob a curva de densificação. Para esta determinação, adotou-se o procedimento desenvolvido por NASCIMENTO (2008), descrito a seguir.

Para o cálculo destas áreas, foi utilizada a técnica de retangularização, ou seja, dividiu-se a área total sob a curva em vários retângulos, cada um com um giro de largura. Para o cálculo da altura de cada retângulo N, fez-se a média entre a %Gmm do CP nos giros N e (N+1), descontando-se desta média a %Gmm do CP no Limite Inicial do cálculo (%Gmm@LI). Assim, obteve-se a área de cada retângulo N. Logo, para a determinação dos parâmetros de compactação, bastou somar as áreas dos N retângulos inseridos nos limites de CDI e TDI. Na Figura 12, é ilustrado um esquema do processo de retangularização para o cálculo do CDI. De acordo com a Figura 12, a área de cada retângulo N pode ser calculada conforme Equação 09.

$$A_N = \left[\left(\frac{\%Gmm@N + \%Gmm@(N + 1)}{2} \right) - \%Gmm@LI \right] \quad (09)$$

Onde:

A_N = área de um retângulo N qualquer;

$\%Gmm@N$ = porcentagem do Gmm em um giro N;

$\%G_{mm}@N+1$ = porcentagem do Gmm em um giro (N+1);

$\%G_{mm}@LI$ = porcentagem da Gmm no Limite Inicial: no caso do CDI é a $\%G_{mm}@N_{ini}$ e no caso do TDI é 92%.

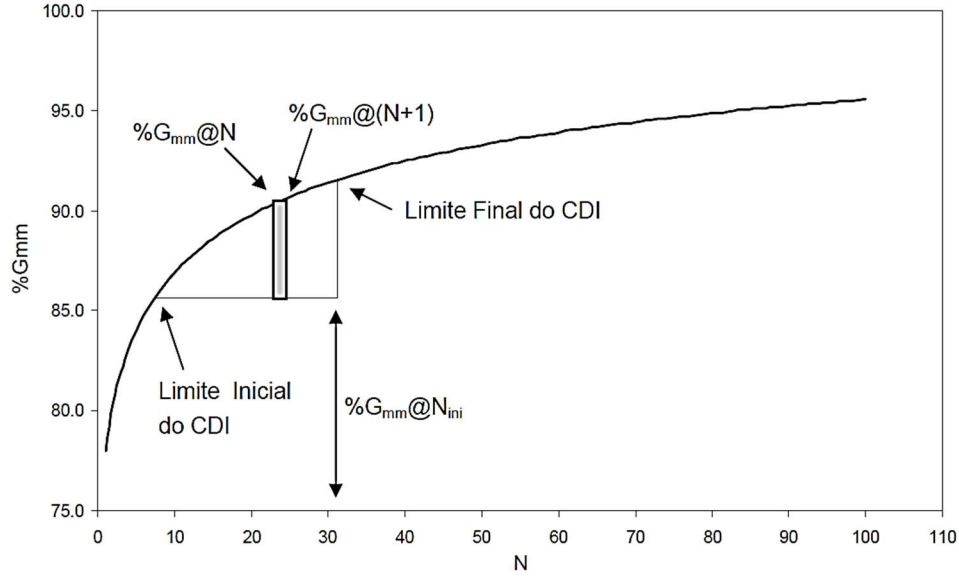


Figura 12: Esquema do método de retangularização para o cálculo de CDI e TDI (NASCIMENTO, 2008)

As Equações 10 e 11 seguintes definem o cálculo dos parâmetros CDI e TDI, por este procedimento proposto por NASCIMENTO (2008) e utilizado nesta pesquisa.

$$CDI = \sum_{N_{inicial}}^{N@92\%G_{mm}} A_N \quad (10)$$

$$TDI = \sum_{N@92\%G_{mm}}^{N@98\%G_{mm}} A_N \quad (11)$$

Onde:

$N@92\%G_{mm}$ = número do giro equivalente a 92% da Gmm;

$N@98\%G_{mm}$ = número do giro equivalente a 98% da Gmm.

3.4.4 Parâmetros de dosagem

Em estudo de BAHIA e FAHEEM (2007) foram analisadas misturas asfálticas de diferentes procedências, obtendo-se corpos de prova em laboratório visando caracterizar seu comportamento durante a compactação giratória. Foram produzidas diversas misturas asfálticas, moldadas pelo compactador giratório, usando 4 diferentes origens de agregados minerais, diferentes teores e tipos de asfalto (PG 64-28 e PG 58-28) e diferentes granulometrias.

BAHIA e FAHEEM (2007) concluíram que o compactador giratório pode ser utilizado não apenas para produzir corpos de prova para análises das propriedades volumétricas, mas também para estimar a trabalhabilidade e a estabilidade mecânica das misturas no processo de dosagem. Os autores sugeriram limites que poderiam ser adotados como critério de dosagem de misturas asfálticas, servindo para estimativas da resistência à compactação e à deformação permanente sob o tráfego simulado. Porém, ressaltam que esses limites precisavam de validação em campo. A Tabela 29 apresenta os critérios de dosagem sugeridos por BAHIA e FAHEEM (2007).

Tabela 29: Critérios de dosagem de misturas asfálticas propostos por BAHIA e FAHEEM (2007)

Trabalhabilidade	
Tráfego	CDI (máximo)
Leve ($< 3,0 \times 10^6$)	100
Médio ($< 1,0 \times 10^7$)	200
Médio a Pesado ($< 3,0 \times 10^7$)	300
Resistência à Deformação Permanente	
Tráfego	TDI (mínimo)
Leve ($< 3,0 \times 10^6$)	400
Médio ($< 1,0 \times 10^7$)	800
Médio a Pesado ($< 3,0 \times 10^7$)	1200

Nota: Tráfego expresso em *Equivalent Single Axle Load* – ESAL

BAHIA e FAHEEM (2007) obtiveram os parâmetros de deformação permanente, limites de TDI, a partir da avaliação de resistência a deformação permanente pelo ensaio de *Flow Number* (FN), obtendo uma boa correlação.

De acordo com MAHMOUD e BAHIA (2004) espera-se que, as misturas com valores mais elevados de CDI exijam uma grande quantidade de energia para densificar durante a construção. Portanto, valores CDI inferiores são desejáveis, porque serão necessários menos passagens de rolos. Uma vez que o tráfego está liberado no pavimento, é desejável para o pavimento que ele exija uma grande quantidade de energia (alto volume de tráfego) para densificar. Logo, são desejáveis valores elevados de TDI. O pavimento ideal seria fácil de densificar durante a construção (CDI baixo) e difícil de compactar sob o tráfego (TDI elevado).

Estudo de NASCIMENTO (2008) teve como principal objetivo a proposição de uma nova abordagem para a dosagem de misturas asfálticas densas, com foco na prevenção da deformação permanente, baseada em critérios oriundos do comportamento dos materiais na compactação giratória e em ensaios mecânicos. Foram utilizados diferentes agregados minerais, granulometrias e dois ligantes (PG 64-22 e PG 58-22) para o preparo das misturas asfálticas utilizadas nesse citado trabalho.

Visando adequado desempenho em termos de deformação permanente, NASCIMENTO (2008) recomendou os seguintes critérios para a dosagem de misturas asfálticas densas utilizadas como camada de revestimento em rodovias brasileiras:

a. Tráfego Médio:

- $CDI > 50$;
- $TDI > 250$.

b. Tráfego Pesado:

- $CDI > 50$;
- $TDI > 400$.

NASCIMENTO (2008) constatou que os ensaios de deformação permanente no simulador de tráfego francês e o uniaxial de carga repetida (FN) tiveram boa correlação entre si e foram sensíveis às variações do esqueleto pétreo. Verificou-se boas correlações entre os resultados destes ensaios e o CDI; as quais foram ainda melhores com o TDI.

Salienta-se aqui o fato de que NASCIMENTO (2008) utilizou o CDI com um enfoque diferente de BAHIA e FAHEEM (2007), avaliando a resistência a deformação permanente ao invés da compatibilidade da mistura. O autor constatou que a deformação permanente das misturas com o esqueleto pétreo de menor CDI foi maior do que a das misturas de maior CDI, ou seja, a estabilidade das misturas asfálticas está primordialmente associada ao esqueleto pétreo (CDI), dependendo pouco do ligante asfáltico utilizado. A Figura 13 ilustra esquematicamente o uso do CDI como parâmetro adicional de dosagem com o SGC e o limite definido pelo autor.

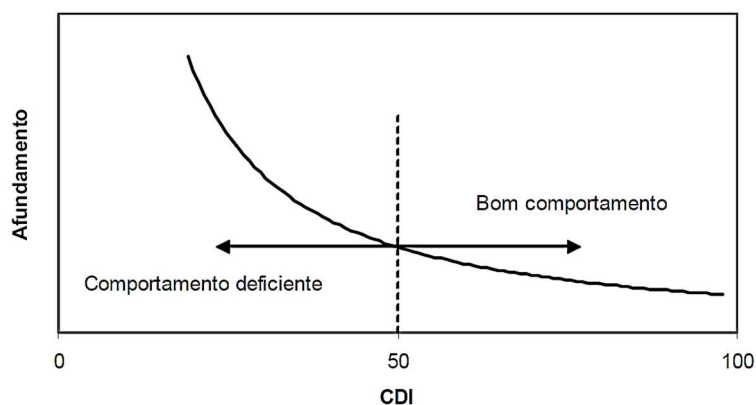


Figura 13: Ilustração esquemática do uso do CDI como parâmetro de dosagem (NASCIMENTO, 2008)

De acordo com NASCIMENTO (2008) na região acima deste valor limite, $CDI > 50$, que seriam as misturas com comportamento adequado quanto à deformação permanente, há pouca variação do afundamento para grandes variações do CDI, seja, conseguido um intertravamento mínimo do esqueleto mineral decai a “taxa de melhora” do afundamento, e a curva tende a uma horizontal assintótica que já é limitada por outras variáveis da dosagem.

Vale ressaltar que todos estes parâmetros foram obtidos a partir de corpos de prova de 150 mm de diâmetro e aproximadamente 110 mm de altura, provenientes do processo de dosagem *Superpave*.

Tanto NASCIMENTO (2008), quanto BAHIA e FAHEEM (2007), obtiveram estes parâmetros de dosagens de misturas compostas por ligantes convencionais, em temperaturas quentes, compactadas nas mesmas faixas de viscosidade. Deve-se considerar que o processo de compactação giratória ocorre em temperaturas muito elevadas, que são ajustadas para garantir que os diferentes ligantes asfálticos tenham a mesma consistência (ou viscosidade) durante o processo.

Assim, associar estes parâmetros isoladamente ao comportamento global das misturas asfálticas na deformação permanente torna-se temerário, uma vez que durante esta compactação o efeito da consistência dos vários ligantes é praticamente eliminado. Assim, a expectativa é que os índices oriundos da compactação giratória estejam associados exclusivamente à estabilidade do esqueleto pétreo, sofrendo pouca influência do tipo (ou consistência) do ligante asfáltico (NASCIMENTO, 2008).

3.4.5 Procedimento adotado

A partir do ano 2000, os procedimentos de dosagem dos corpos de prova passaram a indicar a compactação com o número de giros de projeto (Nproj) ao invés do N_{máx} usado anteriormente, visando minorar erros nas propriedades volumétricas no Nproj. Com o teor de projeto definido corpos de prova deveriam ser compactados no N_{max} para verificar se a %Gmm seria menor do que 98% no N_{max} e também para o cálculo do TDI. Segundo NASCIMENTO (2008), a melhor maneira de se determinar o TDI requer o preparo de 3 CPs adicionais, no teor de projeto, que devem ser compactados até, pelo menos, atingirem 98% da Gmm.

Foi enviada ao IPR um projeto de norma de instrução de ensaio DNIT /2017 – IE, ainda sem número, sobre a determinação dos parâmetros CDI e TDI. Este procedimento define como obter os parâmetros denominados índice de densificação na compactação CDI e índice de densificação do tráfego TDI durante a dosagem de uma mistura asfáltica densa pelo método de compactação giratória (DNIT /2017 – IE). Nesta norma constará que os índices CDI e TDI devem ser determinados em corpos de prova de 150 mm de diâmetro e aproximadamente 110 mm de altura.

Alguns trabalhos, como por exemplo CAVALCANTI (2010), fizeram (e fazem) uso do molde de 100 mm de diâmetro interno para a dosagem de misturas, calculando, por consequência, o índice CDI para estes corpos de prova e, o TDI em CPs extras moldados no teor de projeto, também no molde de 100 mm. Por este motivo, tendo em vista que os parâmetros de dosagens relacionados aos índices de compactação giratório foram determinados a partir de CPs moldados com diâmetro de 150 mm, optou-se pela determinação do CDI e TDI para todas as misturas nas duas dimensões. Assim, pretende-se averiguar se o uso do molde menor acarreta em alterações na obtenção dos índices, ou se o tamanho reduzido pode ser usado, resultando em economia de material.

Para tanto, foram moldados pelo menos 3 CPs por mistura para cada dimensão de molde, 100 e 150 mm. Para a execução dos corpos de prova no molde de 100 mm de diâmetro interno, foi utilizada massa da mistura de 1200g, onde foram aplicados 600 giros para determinação da curva de compactação. Já para os CPs executados com o molde de 150 mm de diâmetro interno, foi utilizada massa de 4700g, onde foram aplicados 300 giros. A quantidade de giros foi adotada por se perceber que as misturas alcançavam o valor de 98% da Gmm para cálculo do TDI antes do fim da compactação, atingindo valores inferiores a 2% de vazios. A variação da quantidade observada de giros necessária para atingir a mesma densificação, numa mesma mistura, porém com moldes de diâmetros diferentes, já é um indício de não haver correlação nos valores dos índices para as diferentes geometrias.

3.5 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIOS MECÂNICOS

Após a dosagem para a obtenção do teor de projeto utilizado nas misturas, conferência de critérios volumétricos e definição das respectivas Gmm's das misturas estudadas, foram feitas as moldagens dos corpos de prova para os ensaios mecânicos das misturas asfálticas.

A preparação dos corpos de prova para ensaios mecânicos usando compactador giratório foi feita conforme a norma de procedimento de ensaios DNIT 178/2018 – PRO. Este procedimento estabelece as condições de preparação e compactação de misturas asfálticas de laboratório ou de usina visando obter corpos de prova padronizados, para avaliação das suas características volumétricas e mecânicas. Aplica-se a dois procedimentos de compactação: giratório e de impacto (Marshall). Aspectos ligados aos equipamentos principais de aplicação da energia de compactação diferem nos dois tipos de equipamentos e são definidos individualmente. Utensílios e equipamentos auxiliares e as características da preparação das amostras são iguais para os dois equipamentos (DNIT 178/2018 – PRO).

Para executar a moldagem dos corpos de prova, devido as diferentes geometrias e volumes de vazios, optou-se por fazer a moldagem fixando a altura dos CPs, possibilitando prever a quantidade de vazios, levando em consideração a correção da Gmb para cálculo da massa do corpo de prova para se alcançar o volume de vazios desejado. A correção da densidade aparente estimada se dá porque no cálculo do volume do corpo de prova é considerado que o cilindro representativo é perfeito, sendo ignoradas as irregularidades superficiais que levam a um volume levemente superior (NASCIMENTO, 2008). Para o cálculo da massa dos CPs adotou-se o mesmo procedimento utilizado por CAVALCANTI (2010), segundo as Equações 12, 13, 14, 15 e 16:

$$C = \frac{Gmb(medida)}{Gmb(estimada)} \quad (12)$$

Onde:

C = fator de correção;

Gmb (medida) = densidade específica aparente medida;

$$Gmb(estimada) = \frac{M_{cp}}{V_{cp}} \quad (13)$$

Onde:

Mcp = massa do corpo de prova;

$$M_{cp} = G_{mm} \cdot V_{cp} \cdot \left(\frac{100 - V_v\%}{100} \right) \quad (14)$$

Onde:

Vcp = volume do corpo de prova;

Gmm = Densidade máxima medida;

$$V_{cp} = \frac{h \cdot \pi \cdot d_{molda}^2}{4} \quad (15)$$

Onde:

h = altura estimada do corpo de prova;

d_{molde} = diâmetro do molde (100mm);

Assim pode-se fazer o cálculo da Massa corrigida pela Equação 16.

$$M_c = C \cdot M_{cp} \quad (16)$$

Onde:

M_c = massa corrigida do corpo de prova e que será usada para moldagem

3.6 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS

3.6.1 Dano por umidade induzida

É de suma importância a avaliação do dano causado por umidade nas misturas asfálticas, visto que afeta a vida de serviço e o desempenho dos pavimentos, além de evidenciar possíveis problemas de adesividade agregado-ligante asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2010). Estes tipos de ensaios são divididos em duas categorias, os realizados em mistura não-compactadas e os em misturas compactadas. Para esta pesquisa, dentre os ensaios de sensibilidade à ação deletéria da água, optou-se pelo conhecido como Lottman modificado, que tem norma DNIT e ABNT.

Os corpos de prova devem ser moldados com vazios de $7\% \pm 1\%$, e os que sofrem o condicionamento devem ser saturados em dessecador (Figura 14 A) com aplicação de vácuo para alcançar taxa de saturação entre 55% e 80% segundo ABNT NBR 15617/08 e a AASHTO T 283. A mesma norma cita dois tipos de condicionamento para as amostras, variando quanto à severidade.

Optou-se pelo condicionamento severo, no qual, após a saturação os corpos de prova passaram por um ciclo de congelamento na temperatura de $-18^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ durante o mínimo de 16 horas, depois por um banho a 60°C por 24 horas e para finalizar um banho de 25°C entre 2h a 3h. A norma DNIT 180/2018 - ME utiliza apenas esta forma de condicionamento descrita. Nas Figura 14 B e Figura 14 C mostram-se os corpos de prova condicionados para o congelamento e no banho de 60°C . A Figura 14 D mostra uma amostra durante o ensaio de RT e o equipamento de aquisição de dados.

A análise é feita pela relação entre a resistência à tração média de três CPs com condicionamento prévio e de três CPs sem condicionamento. Esta relação é denominada Resistência Retida à Tração (RRT). A Equação 17 representa a fórmula de cálculo do RRT.

$$RRT = \frac{RTc}{RT} \times 100 \quad (17)$$

Onde:

RRT = resistência retida à tração (%);

RTc = resistência à tração de amostras com condicionamento;

RT = resistência à tração de amostras sem condicionamento;

A especificação de serviço (ES) DNIT 031/2006 recomenda que a razão da resistência à tração por compressão diametral estática (RRT) antes e após a imersão deve ser superior a 70%. Na presente pesquisa admitiu-se o valor mínimo de 80% como o adequado para decidir sobre a qualidade da adesividade ligante-agregado, segundo especificado na AASHTO R 35-15 para misturas mornas, AASHTO M 323-13 para misturas quentes, entre outras.



A – Aplicação de vácuo nos CPs



B: Condicionamento dos CPs para congelamento



C – Condicionamento dos CPs em banho a 60°C



D: Ensaio de RT sendo realizado

Figura 14: Etapas do ensaio de dano por umidade induzida feito nesta pesquisa

3.6.2 Módulo de Resiliência (MR)

Nesta pesquisa foram realizados ensaios de módulo de resiliência (MR) segundo as recomendações da norma DNIT 135/2017. Os testes foram feitos a 25°C, aplicando vários níveis de carga entre 5 % e 25 % da resistência à tração por compressão diametral média obtida, em corpos de prova com diâmetro de $101,6 \text{ mm} \pm 3,8 \text{ mm}$ e altura entre 35 mm e 70 mm, em CPs com $4 \pm 0,5\%$ de vazios. A aplicação de carga é executada à frequência de 1 Hz, com pulso de carga completo de duração de 0,1 s e período de repouso com duração de 0,9 s, e as leituras dos deslocamentos obtidas a partir de um LVDT (*Linear Variable Differential Transducers*).

Utilizou-se um equipamento desenvolvido pela COPPE/UFRJ para a execução do ensaio. O equipamento é composto de um sistema pneumático de carregamento, uma câmara para controle de temperatura, um sistema de medição de deformação da amostra, um *software* para aquisição e análise de dados e uma estrutura de suporte e alinhamento do corpo de prova. O MR foi calculado a partir de, pelo menos, 3 CPs por mistura estudada. Observa-se na Figura 15 o equipamento utilizado para a execução do ensaio de módulo de resiliência e o ensaio sendo realizado em um CP pertencente a uma das misturas asfálticas deste estudo.

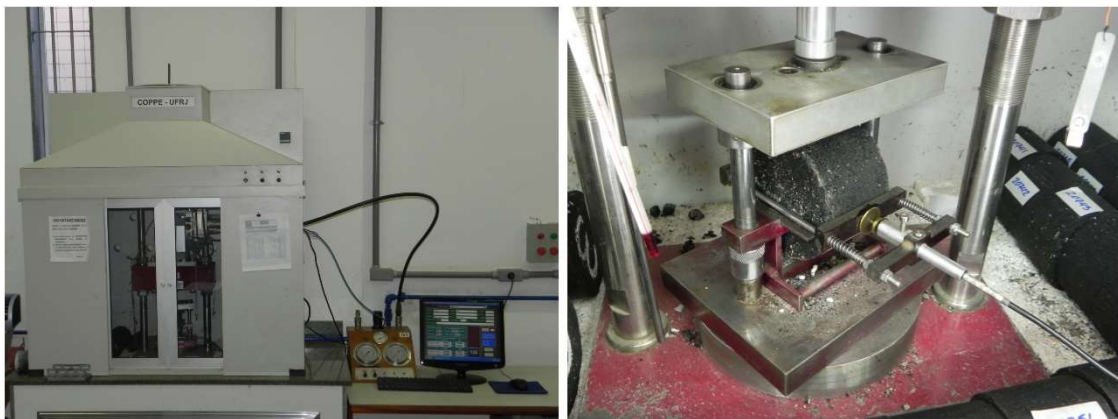


Figura 15: Equipamento do Laboratório de Pavimentação da COPPE utilizado no ensaio de módulo de resiliência nesta pesquisa

Mantendo a prática brasileira, desde a primeira norma de ensaio de 1986 do DNER, define-se o módulo de resiliência como a relação entre a tensão de tração e a deformação de tração, geradas no ensaio de compressão diametral sob carga repetida, com a medição do deslocamento na condição externa do sensor, correspondente ao ponto de interseção entre as duas tangentes que representam a inclinação das duas partes da curva de deslocamento durante o ensaio. Para o corpo de prova correspondente ao diâmetro de 101,6 mm, calcula-se pela Equação 18.

$$MR = \frac{P}{|\Delta H|t} (0,2692 + 0,9976\mu) \quad (18)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, em MPa;

P = carga cíclica, em N;

ΔH = o deslocamento horizontal (elástico ou resiliente), na interseção das duas tangentes, em mm;

t = espessura (altura) do corpo de prova, em mm;

μ = o coeficiente de *Poisson*.

De acordo com uma nota que consta na DNIT 135/2017, no banco de dados brasileiros de módulo de resiliência, o coeficiente de *Poisson* correntemente adotado é de 0,3, para ensaios a 25°C, não sendo usual a medida desta característica.

Cada um dos três corpos de prova de cada mistura foi submetido a três níveis de cargas, e os valores de MR admitidos de cada corpo de prova é sempre a média dos MR obtidos nesses três ciclos. O valor de MR adotado para a mistura foi a média dos valores de MR admitidos de cada corpo de prova, após análise de dispersão. Este procedimento estatístico é o adotado pelo Laboratório de Pavimentação da COPPE para determinação do MR, para um nível de confiança de 95%.

3.6.3 Resistência a tração indireta (RT)

Este ensaio foi desenvolvido em 1943 pelo professor Lobo Carneiro, no Rio de Janeiro, para avaliação da resistência à tração de concreto de cimento Portland. O ensaio também é conhecido como “ensaio brasileiro” e determina a resistência à tração indireta através da compressão diametral de um corpo de prova cilíndrico. Em 1972 passou a ser usado também para caracterização de misturas asfálticas.

Nesta pesquisa, a resistência à tração (RT) foi avaliada por meio de ensaio de carregamento estático por compressão diametral, segundo as recomendações da norma DNIT 136/2017 - ME. O ensaio se dá pela aplicação de um esforço compressivo na taxa de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, carregamento estático crescente até a ruptura (monotônico), no plano diametral vertical de corpos de prova cilíndricos a 25°C, medindo $10 \pm 0,2$ cm em diâmetro e altura entre 3,50 cm e 6,50 cm. A Figura 16 ilustra o equipamento utilizado e o ensaio de RT sendo realizado em um CP pertencente à uma das misturas asfálticas deste estudo.

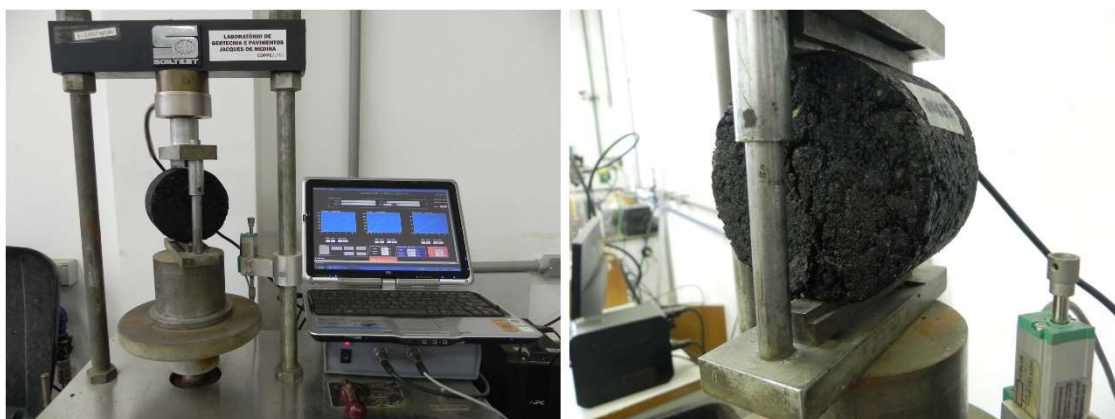


Figura 16: Equipamento do Laboratório de Pavimentação da COPPE utilizado no ensaio de resistência à tração por compressão diametral

De acordo com a especificação de serviço DNIT ES 031/2006 - ES concretos asfálticos destinados à camada de rolamento ou de *binder* devem apresentar RT (a 25°C) mínima de 0,65 MPa.

O valor da resistência à tração é calculado pela Equação 19 e, para misturas asfálticas, admite-se que o corpo de prova rompe devido à tensão de tração uniforme gerada ao longo do diâmetro solicitado que se iguala à tensão máxima admissível do material ($\sigma_{adm} = RT$). Admite-se que a tensão admissível está em regime elástico durante todo o ensaio (BERNUCCI *et al.*, 2010).

$$RT = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (19)$$

Onde:

RT = resistência à tração, à temperatura de ensaio, em MPa;

F = carga de ruptura, em N;

D = diâmetro do corpo de prova, em mm;

H = altura do corpo de prova (espessura), em mm.

A RT foi obtida para todas as misturas em CPs com $4 \pm 0,5\%$ de vazios. A resistência à tração por compressão diametral da amostra da mistura asfáltica de corpos de prova moldados em laboratório, nas mesmas condições, é a média aritmética dos valores obtidos de três corpos de prova, desde que a variação entre os valores individuais e a média esteja em um intervalo de $\pm 10\%$.

3.6.4 *Flow Number* (FN)

De acordo com um estudo norte-americano realizado pelo *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) e relatado no Report 465 (WITCZAK *et al.*, 2002), o *flow number* é o parâmetro oriundo do ensaio uniaxial de carga repetida que melhor se relaciona com a deformação permanente de misturas asfálticas. O procedimento do ensaio é descrito no projeto de norma DNIT /2017 – ME e na NBR 16505/2016.

A Figura 17 ilustra um gráfico típico do ensaio uniaxial de carga repetida para a determinação da resistência à deformação permanente, onde se observam duas curvas em função do número de ciclos do ensaio: a curva da taxa de deformação plástica vertical uniaxial e a curva de deformação plástica específica acumulada. A deformação permanente acumulada (ϵ_p) pode ser dividida em três zonas: primária, secundária e terciária. A taxa de deformação plástica vertical uniaxial é calculada, correspondendo a deformação plástica vertical que o corpo de prova acumula a cada ciclo de carregamento.

O FN é associado ao ciclo onde a taxa de deformação plástica é mínima, a partir deste ciclo o corpo de prova entra na zona terciária, onde atinge a ruptura passando a sofrer cisalhamento a volume constante (MEDINA e MOTTA, 2015).

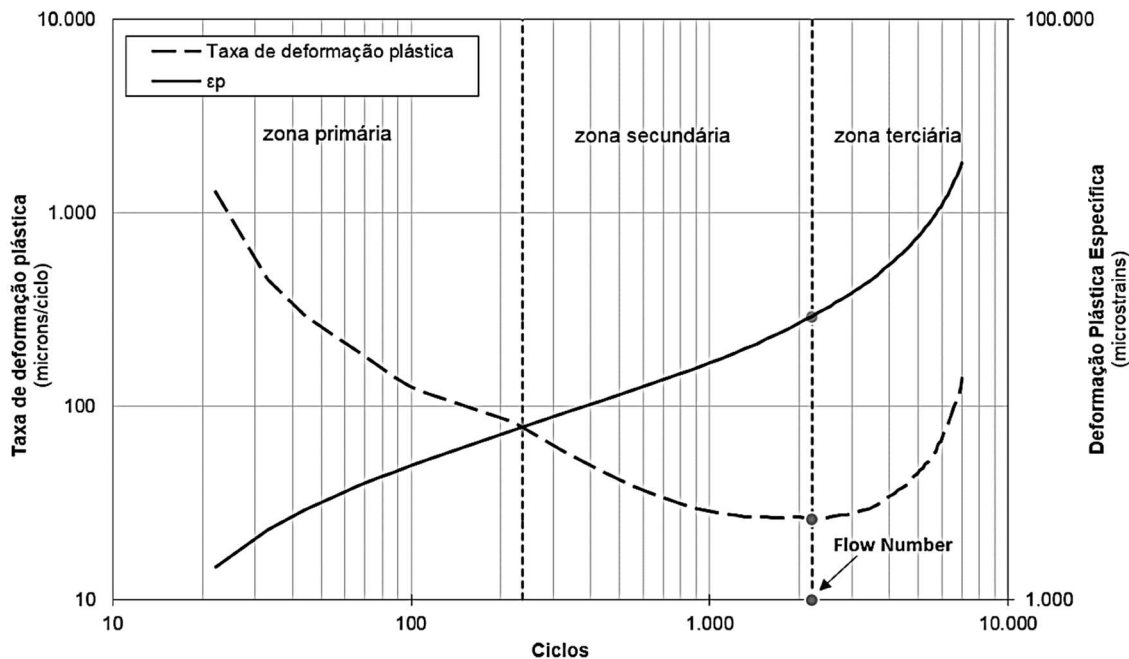


Figura 17: Curva típica do ensaio uniaxial de carga repetida de misturas asfálticas (DNIT /2017 – ME)

O ensaio consiste em aplicar um carregamento repetido de 204 ± 4 kPa, com o pulso de aplicação da carga de 0,1 s e período de repouso de 0,9 s, em corpos de prova com volume de vazios de $7 \pm 0,5$ %, altura de $150,0 \pm 2,5$ mm e o diâmetro de $102,0 \pm 2,0$ mm, em uma temperatura de $60 \pm 0,5$ °C. O FN de cada mistura é obtido a partir da média de pelo menos três corpos de prova. Observa-se na Figura 18 o equipamento utilizado no ensaio uniaxial de carga repetida para determinação do FN e o ensaio sendo realizado em um CP pertencente a uma das misturas asfálticas deste estudo.



Figura 18: Equipamento do Laboratório de Pavimentação da COPPE utilizado no ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente (FN)

Visando adequado desempenho em termos de deformação permanente, NASCIMENTO (2008) recomendou os seguintes critérios para a dosagem de misturas asfálticas densas utilizadas como camada de revestimento em rodovias brasileiras:

a. Tráfego Médio:

- FN @ 60°C (204kPa) > 300;

b. Tráfego Pesado:

- FN @ 60°C (204kPa) > 750;

Com base nos dados apresentados no trabalho de NASCIMENTO (2008) e visando adequada análise em termos de deformação permanente, foram desenvolvidos os limites das classes de desempenho das misturas asfálticas quanto à deformação permanente, que estão apresentados na Tabela 30, e devem ser atendidos de acordo com o novo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) de Pavimentos.

Tabela 30: Critérios de deformação permanente de misturas asfálticas pelo ensaio FN (DNIT, 2018)

Classe	Flow Number (FN)	N serviço (Nser) recomendado em	
		Normais	Severas
1	FN ≥ 100 ciclos	Nser < 1e ⁶	Não recomendado
2	100 ciclos ≤ FN < 300 ciclos	1e ⁶ ≤ Nser < 1e ⁷	Nser < 1e ⁶
3	300 ciclos ≤ FN < 750 ciclos	1e ⁷ ≤ Nser < 1e ⁸	1e ⁶ ≤ Nser < 1e ⁷
4	750 ciclos ≤ FN < 2000 ciclos	Nser ≥ 1e ⁸	1e ⁷ ≤ Nser < 1e ⁸
5	FN ≥ 2000 ciclos	-	Nser ≥ 1e ⁸

De acordo com o Manual de Utilização do MeDiNa (DNIT, 2018), as condições de tráfego e da via normais correspondem a velocidades acima 60 km/h, via sem intersecções, sem terceira faixa e/ou temperatura máxima do revestimento asfáltico moderada. Por outro lado, as condições severas implicam em tráfego lento, velocidades inferiores a 60 km/h, intersecções, terceira faixa, praças de pedágio, tráfego canalizado, paradas de ônibus e/ou temperatura máxima do revestimento elevada. Considera-se a temperatura máxima moderada do revestimento asfáltico quando, determinada conforme norma AASHTO M 323, for igual ou inferior a 64°C. Quando a mesma temperatura máxima média for superior a 64°C, então considera-se elevada.

3.6.5 Fadiga (Tração indireta por compressão diametral)

O projeto de norma DNIT /2017 - ME (pavimentação asfáltica - ensaio de fadiga por compressão diametral a tensão controlada – método de ensaio), ainda sem número, define fadiga como a redução da resistência de um material sob um carregamento repetido, de magnitude inferior à sua resistência sob o carregamento estático. Também se refere à vida de fadiga em um revestimento asfáltico como definida pelo volume de tráfego, expresso por número equivalente do eixo padrão (N), que ele pode suportar antes que o dano observado, em termos de quantidade de trincas, atinja uma determinada porcentagem de área trincada admissível, para cada tipo de via.

A vida de fadiga de uma mistura asfáltica é definida em termos de vida de fratura ou vida de serviço. A primeira se refere ao número total de aplicações de certa carga necessária para ocorrer a fratura completa da amostra. A vida de serviço se refere ao número total de aplicações dessa mesma carga que reduza o desempenho ou a rigidez da amostra a um nível preestabelecido (BERNUCCI *et al.*, 2010).

A simulação da aplicação de esforços aponta a preferência pelos ensaios de flexão na simulação da vida de fadiga. Porém, devido a maior facilidade de execução, principalmente para o sistema de carregamento pneumático e de moldagem, adotou-se o ensaio de compressão diametral como o mais conveniente no Brasil, até o momento, devido a larga experiência das últimas décadas com este ensaio. Este também foi o tipo de ensaio utilizado neste trabalho para avaliar as misturas dos experimentos desta dissertação. Observa-se na Figura 19 o equipamento utilizado no ensaio fadiga por compressão diametral e o ensaio sendo realizado em um CP pertencente a uma das misturas asfálticas deste estudo. Este equipamento também realiza ensaio de MR e FN, nas condições particulares de cada um.



Figura 19: Equipamento do Laboratório de Pavimentação da COPPE utilizado no ensaio de fadiga

O ensaio é feito à tensão controlada (TC), ou seja, a tensão σ_t é aplicada repetidamente e induzida pela força vertical distribuída no friso da geratriz, não se alterando até a ruptura do corpo de prova (MEDINA e MOTTA, 2015). O ensaio de fadiga visa a obtenção de um número de solicitações que uma determinada carga levaria a mistura asfáltica a uma condição de ruptura.

A vida de fadiga no ensaio à tensão controlada pode ser expressa em relação às tensões, ou com base na deformação resiliente inicial (ϵ_i). A deformação resiliente inicial pode ser calculada indiretamente em função do módulo de resiliência (MR) da mistura asfáltica (DNIT /2017 - ME). Este cálculo foi feito utilizando o MR médio das misturas.

O ensaio foi realizado seguindo as especificações de projeto de norma DNIT /2017 - ME. Foram aplicados ciclos de carga em uma frequência de 1 Hz, carregamento de 0,1 s e repouso de 0,9 s, em ensaios de tração indireta em amostras medindo 100 mm de diâmetro e entre 40 mm e 70 mm em espessura, em CPs com $4 \pm 0,5\%$ de vazios. A amplitude da carga para uma tensão de tração específica inicial é mantida constante durante o ensaio até a ruptura do corpo de prova. Foram escolhidos quatro níveis de tensão entre 7% e 40% do valor da carga, que resultaria na resistência à tração da amostra (RT). A ruptura total dos corpos de prova foi usada como critério para a determinação dos ciclos de fadiga em cada ensaio. Foram usados pelo menos dois corpos de prova em cada um dos níveis de tensão avaliados. Se o coeficiente de determinação (R^2) da curva for menor que 0,8, deve-se aumentar o número de CPs por nível de carga para tentar melhorar o ajuste.

3.7 ANÁLISE ESTRUTURAL

Para misturas que apresentem módulos de resiliência semelhantes (MR), é possível uma análise comparativa entre as curvas de fadiga para um mesmo valor de diferença de tensões ($\Delta\sigma$) ou de deformações. Entretanto, se os materiais apresentarem valores de MR com diferentes ordens de grandeza, a análise não pode ser feita de forma direta, visto que este tipo de ensaio está condicionado pela própria rigidez de cada mistura, entre outros aspectos. Assim, deve-se considerar o fato de que há forte influência da estrutura completa do pavimento sobre a vida de fadiga de cada mistura asfáltica.

Para realização de uma análise mais adequada dos resultados de curvas de fadiga das misturas desta pesquisa, foram feitas simulações utilizando o programa MeDiNa 2018, versão 1.0.0. A Figura 20 apresenta a tela inicial do *software*.

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetba	5,0	9000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C5	17,0	381	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG(1)	30,0	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

Figura 20: Tela inicial do *Software* MeDiNa 2018 v.1.0.0

O MeDiNa 2018 é um programa de computador que realiza a verificação e o dimensionamento de estruturas de pavimentos por método mecanístico-empírico, por meio da rotina AEMC de análise de camadas elásticas de múltiplas camadas. O programa permite apenas utilizar a expressão de fadiga por meio das relações do número de ciclos com a deformação específica resiliente de tração, conforme a Equação 20.

$$N_{fad} = K1. \varepsilon_t^{K2} \quad (20)$$

Onde:

N_{fad} = vida de fadiga;

ε_t = deformação específica resiliente de tração;

K1 e K2 = parâmetros da curva de fadiga.

Para o cálculo da fadiga, o programa MeDiNa utiliza o estado de tensões calculado em dez pontos na superfície, espaçados de 3,65cm, e mais dez pontos na fibra inferior da última camada asfáltica. O dano de fadiga é calculado em cada um dos vinte pontos e é feita a média. A partir da média, o programa MeDiNa calcula a área trincada com base em uma função transferência estabelecida por comparação com segmentos monitorados (DNIT, 2018). A área trincada limite utilizada como critério de dimensionamento é de 30% e a espessura de cada uma das camadas asfálticas é limitada entre 5cm e 15cm.

A função de transferência utilizada no novo método mecanístico-empírico foi estabelecida na tese de FRITZEN (2016), sendo uma calibração para a previsão do dano por fadiga. Foi baseada em ensaios mecânicos de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral de cargas repetidas de misturas asfálticas, em comparação com resultados de segmentos experimentais construídos e monitorados anualmente, desde sua implantação, nas principais vias da Cidade Universitária, e na porcentagem de área trincada observada em campo.

A contribuição para a deformação permanente total do pavimento da camada asfáltica no programa MeDiNa é desconsiderada para o cálculo do afundamento de trilha de roda. Porém, o programa, após realizar a avaliação do pavimento ou o dimensionamento da estrutura, apresenta o valor do *Flow Number* mínimo a ser atendido como propriedade da camada asfáltica e que deverá ser exigido no controle de qualidade durante a obra, respeitando as condições normal ou severa do tráfego do local onde o pavimento será construído (DNIT, 2018). Estes valores são interpolados pelo programa para as duas condições de tráfego, normal e severa, baseado nos valores apresentados na Tabela 30.

O módulo de resiliência das camadas asfálticas é considerado como Elástico Linear e deve ser obtido por meio de ensaio por compressão diametral (tração indireta), conforme realizado nesta pesquisa. As características da mistura como faixa granulométrica, teor de CAP, volume de vazios, abrasão Los Angeles, são lançadas pelo projetista de forma que elas possam ser controladas ao longo da sua execução no campo, aparecendo no relatório final, porém não sendo consideradas no dimensionamento.

O MeDiNa assume a carga de roda como sendo uniformemente distribuída em uma área de contato circular entre o pneu e a superfície do pavimento. O Eixo Padrão Rodoviário é o eixo utilizado nas análises e no dimensionamento das estruturas de pavimento. Essa consideração foi definida em função da calibração dos modelos de fadiga, que se baseou na comparação da evolução da área trincada com o número estimado de passagens do eixo padrão (DNIT, 2018). Os dados do eixo padrão estão apresentados a seguir:

- carga de eixo: 8,2 tf;
- pressão de pneus: 0,56 MPa;
- raio da área de contato: 10,79 cm;
- distância entre rodas: 16,2 cm.

Foram feitas simulações no programa MeDiNa considerando dois tipos de estruturas de pavimento, cada uma testada para dois níveis diferentes de tráfego, para realizar o dimensionamento do revestimento das camadas asfálticas utilizando as características das misturas asfálticas preparadas nesta pesquisa. Os materiais das camadas inferiores ao revestimento foram selecionados a partir do banco de dados do programa.

A resposta analisada é a espessura da camada de revestimento, ou a porcentagem de área trincada, caso as camadas sejam dimensionadas com a mesma espessura mínima. O período de projeto considerado no dimensionamento foi de 10 anos. Também foi levada em consideração a deformação específica principal, ϵ_3 (m/m), calculada pelo AEMC no ponto p11, que corresponde à deformação específica de tração no ponto central do eixo na camada inferior do revestimento dimensionado, com eixos X e Y iguais a zero e Z correspondendo a profundidade da camada dimensionada, conforme sistema de coordenadas da Figura 21.

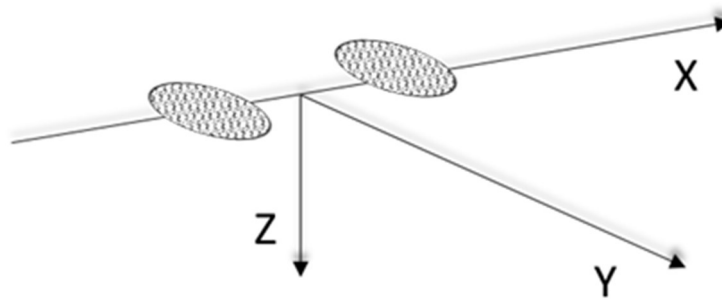


Figura 21: Sistema de coordenadas ajustadas para o Eixo Padrão Rodoviário (DNIT, 2018)

Para fins de comparação, foi considerado em algumas análises o método vigente de dimensionamento de revestimentos, que está especificado no Manual de Pavimentação (DNIT, 2006). O dimensionamento é feito atribuindo uma espessura mínima para o revestimento betuminoso em função do N previsto para o pavimento. O método foi elaborado e apresentado pelo professor Murillo Lopes de Souza, do Instituto de Pesquisas Rodoviárias, IPR/DNER, em 1966, com última edição em 1981. Atualmente, é o método utilizado para dimensionamento no Brasil.

Em DNIT (2006) consta que a fixação da espessura mínima a adotar para os revestimentos betuminosos é um dos pontos ainda em aberto na engenharia rodoviária, quer se trate de proteger a camada de base dos esforços impostos pelo tráfego, quer se trate de evitar a ruptura do próprio revestimento por esforços repetidos de tração na flexão. As espessuras a seguir recomendadas, Tabela 31, visam especialmente as bases de comportamento puramente granular e foram definidas empiricamente. Recomenda-se que no caso de adoção de tratamentos superficiais, as bases granulares devem apresentar alguma coesão, pelo menos aparentes, seja devido à capilaridade ou ao entrosamento de partículas.

Tabela 31: Espessura mínima de revestimento betuminoso (adaptado de DNIT, 2006)

N	Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo é dedicado a apresentação dos resultados da análise do esqueleto pétreo pelo Método Bailey, dos índices de compactação giratória CDI e TDI e dos ensaios mecânicos das misturas asfálticas a quente e mornas, bem como a análises dos mesmos quanto ao desempenho durante o dimensionamento de estruturas típicas.

4.1 ANÁLISE DO ESQUELETO PÉTREO PELO MÉTODO BAILEY

A curva granulométrica utilizada nas quatro misturas desta pesquisa foi analisada pelo Método Bailey, descrito no Capítulo 3. Foi pré-estabelecido o comportamento gráudo da mistura de agregados, que, de acordo com a AASHTO M 323-13, para um agregado de TMN de 19 mm, corresponde a uma quantidade passante na PCP inferior a 47%. Observando a porcentagem de material passante nesta peneira, indicado na Tabela 32, esta curva granulométrica apresenta comportamento gráudo, visto que tem 42,25% de material passante na PCP, inferior aos 47% indicados pela AASHTO M 323-13.

Os parâmetros do método foram então calculados para a mistura de agregados desta pesquisa utilizando a curva granulométrica deste trabalho, considerando as peneiras de controle referentes ao TMN de 19 mm e comportamento gráudo. A Tabela 32 apresenta as porcentagens passantes nas peneiras de controle, juntamente com as faixas recomendadas e valores calculados para as proporções AG, GAF e FAF:

Tabela 32: Análise do esqueleto pétreo da mistura de agregados desta pesquisa pelo Método Bailey

Peneiras		% passante	Proporções da granulometria adotada desta pesquisa		
TMN	19,00 mm		AG	GAF	FAF
PM	9,50 mm	69,6	0,90	0,56	0,54
PCP	4,75 mm	42,3			
PCS	1,18 mm	23,6			
PCT	0,30 mm	12,9			
Faixas Recomendadas			0,60-0,75	0,35-0,50	0,35-0,50

Posteriormente à obtenção dos parâmetros de proporção da curva, foi verificado, através de cálculos, se a mistura apresentava de fato o comportamento gráudo indicado pela granulometria inicial.

A análise para definição de comportamento do esqueleto pétreo na mistura pode ser realizada de diferentes maneiras. Neste trabalho, seguiu-se o mesmo procedimento adotado por NASCIMENTO (2008). O método baseia-se no princípio de que, se a porcentagem de vazios dos agregados graúdos soltos no estado seco (VAG_{ss}), determinada segundo AASTHO T 19-09, for maior do que a porcentagem de vazios dos agregados graúdos na mistura asfáltica (VAG_{mc}), significa que os agregados finos não estão afastando a fração graúda na mistura. Isto indica que o esqueleto pétreo está sendo formado pela fração graúda. Caso contrário, se a VAG_{mc} for maior do que a VAG_{ss} , então o volume da fração fina da mistura é maior do que o volume de vazios disponível na fração graúda, fazendo com que os agregados graúdos se afastem, tendo a mistura um comportamento fino. O cálculo da VAG_{mc} foi realizado segundo Equação 21.

$$VAG_{mc} = 100 - \left(\frac{G_{mb}}{G_{ca}} \times P_{ca} \right) \quad (21)$$

Onde:

G_{mb} = densidade específica aparente da mistura asfáltica;

G_{ca} = densidade específica aparente dos agregados graúdos;

P_{ca} = porcentagem de agregados graúdos na mistura asfáltica.

Após a seleção da curva granulométrica e moldagem dos CPs foi confirmado o comportamento graúdo inicialmente adotado, através da classificação por granulometria, segundo AASHTO M 323-13. A mistura apresentou VAG_{ss} de 50% e VAG_{mc} de 47%, logo, $VAG_{ss} > VAG_{mc}$, confirmando o comportamento graúdo previamente estipulado. De acordo com estes resultados, verificou-se que a classificação por granulometria, segundo AASHTO M 323-13, forneceu as mesmas respostas da metodologia utilizada, conclusão também obtida nas misturas de NASCIMENTO (2008).

No entanto, na Tabela 32 observa-se que nenhum dos parâmetros referentes à curva granulométrica utilizada enquadram-se nas faixas estipuladas pelo Método Bailey, estando todos com valores acima dos recomendados. Isto indica que, se a granulometria fosse reajustada buscando melhor intertravamento, provavelmente resultaria em uma mistura com menores deformações permanentes do que a deste trabalho. Os altos valores de GAF e FAF justificam o baixo VAM das misturas.

NASCIMENTO (2008) cita como exemplo, 4 diferentes misturas asfálticas que, em período inferior a 30 dias após a sua aplicação, estavam apresentando problemas de afundamento de trilha de roda seguidos por espelhamento do ligante asfáltico. O ligante utilizado foi o mesmo, sendo que em 3 misturas os agregados eram basálticos e numa delas era granítico. Todas as misturas tinham comportamento fino pelo Método de Bailey, sendo que as formuladas com basalto continham quantidades significativas de areia fina de duna (material arredondado). A metodologia de dosagem utilizada foi a Marshall com 75 golpes por face e verificou-se que as misturas foram aplicadas de acordo com os seus projetos.

Analisando-se essas misturas com o SGC, o autor supracitado verificou que todas elas tinham CDI abaixo de 40. Ou seja, os seus esqueletos pétreos não estavam conferindo boa estabilidade à deformação permanente. Para sanar este problema, eliminou-se a areia fina de duna de todos os traços, rearranjaram-se os esqueletos pétreos buscando-se maior intertravamento dos agregados graúdos, gerando uma curva granulométrica de comportamento graúdo, e foram feitas novas dosagens utilizando o SGC com $N_{des} = 100$ giros.

NASCIMENTO (2008) relata que, dentro deste contexto, as misturas passaram a ter valores de CDI mais elevados, entre 85 e 182. Os novos traços foram aplicados nas suas respectivas rodovias atendendo os requisitos de projeto e após 10 meses de tráfego pesado e períodos com altas temperaturas, os problemas de afundamento de trilha de roda foram eliminados. Evidencia-se desta forma, o potencial do uso dos parâmetros de compactação giratória, associados ao Método de Bailey, nos projetos de dosagem das misturas asfálticas.

4.2 ÍNDICES DE COMPACTAÇÃO GIRATÓRIA

Conforme descrito no Capítulo 3, os parâmetros de compactação giratória foram obtidos a partir da moldagem de corpos de prova, para todas as misturas deste trabalho, em duas geometrias distintas. Os índices calculados a partir de CPs compactados no molde de 150 mm de diâmetro interno, dimensão recomendada para a dosagem pela AASHTO R 35-15, serão aqui chamados de CDI e TDI. Já os índices obtidos a partir dos CPs compactados no molde de 100 mm de diâmetro interno, tamanho reduzido, serão aqui chamados de CDIr e TDIr. Esta comparação foi feita visando contrapor os resultados das duas geometrias, devido ao fato de que em muitos estudos brasileiros tem-se utilizados corpos de prova de 100 mm de diâmetro e usados os limites propostos de aceitação que foram propostos a partir de corpos de prova de 150 mm de diâmetro.

A Tabela 33 apresenta os resultados da média do CDI e CDIr das misturas deste trabalho, juntamente com o desvio padrão e a variação percentual do CDI e CDIr em função do CDI de cada mistura, considerando o valor do CDI como o padrão de comparação. A Figura 22 ilustra os dados de CDI e CDIr das misturas, juntamente as linhas tracejadas que representam os parâmetros indicados como limites de BAHIA e FAHEEM (2007) e de NASCIMENTO (2008), citados no Capítulo 3.

A Tabela 34 apresenta os resultados da média do TDIr e TDI das misturas deste trabalho, juntamente com o desvio padrão e a variação percentual do TDI e TDIr, em função do TDI de cada mistura. A Figura 23 ilustra os dados de TDIr e TDI das misturas, juntamente com as linhas tracejadas que representam os parâmetros de dosagem sugeridos por NASCIMENTO (2008) referentes ao TDI.

Tabela 33: Comparação do CDI e CDIr das misturas desta pesquisa

Mistura	CP 100 mm			CP 150 mm			Variação
	CDIr	σ	CPs	CDI	σ	CPs	
HMA1	110	27	3	39	13	5	+ 183%
WMA1	75	26	7	18	17	5	+ 324%
HMA2	89	32	4	48	10	3	+ 87%
WMA2	54	23	5	38	15	6	+ 40%

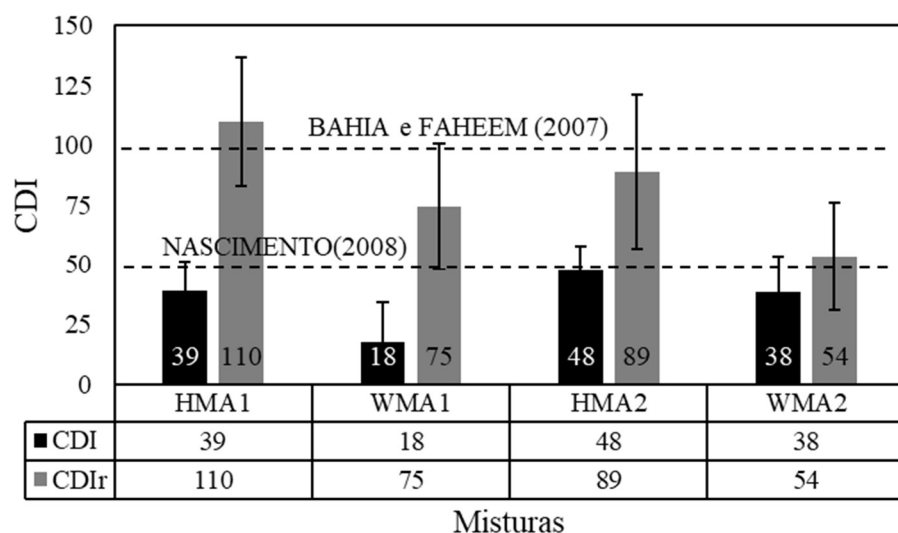


Figura 22: Comparação do CDI e CDIr das misturas desta pesquisa

Tabela 34: Comparação do TDI e TDIr das misturas desta pesquisa

Mistura	CP 100 mm			CP 150 mm			Variação
	TDIr	σ	CPs	TDI	σ	CPs	
HMA1	1463	539,84	3	451	171,00	5	+ 224%
WMA1	996	288,79	7	302	189,67	5	+ 230%
HMA2	1216	319,57	4	550	50,63	3	+ 121%
WMA2	802	197,40	5	463	23,89	4	+ 73%

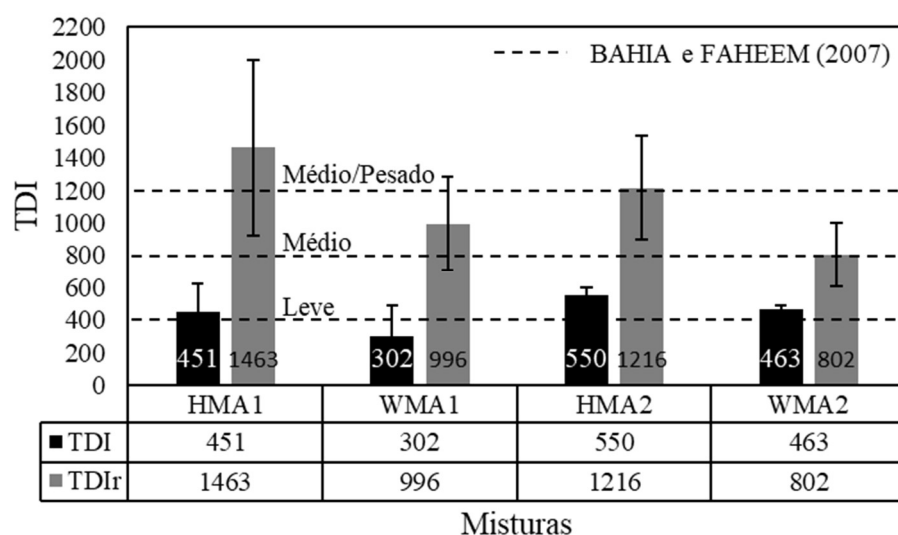


Figura 23: Comparação do TDI e TDIr das misturas desta pesquisa

Analisando estes dados fica claro que os resultados obtidos a partir dos CPs de dimensões reduzidas, CDIr e TDIr, apresentam valores muito maiores para as mesmas misturas que seus respectivos índices, CDI e TDI, compactados com o molde de 150 mm de diâmetro. Observou-se que esta variação é maior entre os índices das misturas 1, que utilizaram ligante convencional, tanto quente quanto morna.

Corpos de prova com dimensões reduzidas geraram uma dispersão maior de resultados de CDIr e TDIr, expressa pelo maior desvio padrão, do que os resultados obtidos a partir dos CPs moldados na geometria maior. Este resultado é coerente, visto que, quando se faz uso do molde de maior dimensão, a quantidade de material utilizado na moldagem é significativamente maior e o efeito de borda do molde menor, gerando resultados mais precisos e representativos da mistura do que quando se faz uso do molde de tamanho reduzido.

Os parâmetros de dosagem, citados no capítulo 3, dos índices de compactação giratória, CDI e TDI, foram estabelecidos com base em curvas gerados por corpos de prova compactados nos moldes de 150 mm de diâmetro. O “tamanho” da diferença encontrada quando se calculam estes índices a partir de curvas de densificação resultantes da compactação de corpos de prova em moldes de 100 mm de diâmetro foi bastante significativa, gerando valores superiores em todas as comparações feitas nesta pesquisa. Portanto, não se deve obter os índices utilizando CPs na dimensão reduzida para comparação com os parâmetros de dosagem estabelecidos a partir de CPs com a dimensão maior, sob pena de classificar erroneamente o comportamento de uma mistura. Para que se possa utilizar a geometria menor para analisar os índices de compactação giratória, deve-se estabelecer e validar limites representativos desta condição.

Como exemplo, analisando a mistura HMA1, é possível perceber que a variação dos resultados em função das dimensões leva a diferentes conclusões. De acordo com NASCIMENTO (2008), para uma mistura ter um adequado desempenho quanto a deformação permanente, é recomendado que tenha um $CDI > 50$. A mistura HMA1 apresenta CDI de 39, abaixo do recomendado, mas quando calculado para a dimensão reduzida este valor, $CDIr$, passa a ser de 110, atendendo o critério. BAHIA e FAHEEM (2007) recomendam que, para que uma mistura tenha boa trabalhabilidade, para um tráfego leve, deve apresentar um CDI máximo de 100. Assim, o $CDIr$ indicaria a não recomendação do uso desta mistura para este nível de tráfego, por indicar dificuldade de compactação, equivocadamente.

A mistura HMA1 apresentou um TDI de 451 e um $TDIr$ de 1463. Ambos os índices apresentam adequado desempenho quanto à deformação permanente, de acordo com o parâmetro sugerido por NASCIMENTO (2008) para tráfego pesado, $TDI > 400$. Porém, quando analisada a mistura HMA1 levando em consideração os parâmetros sugeridos por BAHIA e FAHEEM (2007) quanto a resistência à deformação permanente, se fosse considerado o $TDIr$, o índice indicaria que a mistura atenderia o parâmetro sugerido para tráfego pesado, $TDI > 1200$, mas considerando o real valor de TDI, o resultado indica que ela apenas atenderia a um tráfego leve, $TDI > 400$.

Tendo em vista que os valores de referência são baseados em CPs de 150mm, a análise dos dados das misturas desta pesquisa quanto aos parâmetros de dosagem foi somente para os valores de CDI e TDI calculados a partir dos CPs compactados com o molde de 150mm de diâmetro.

Os valores de CDI das misturas, juntamente com o desvio padrão dos mesmos, número de CPs utilizados e a variação dos índices das misturas quentes para suas respectivas misturas mornas, em função das misturas quentes, encontram-se descritos na Tabela 35 e ilustrados na Figura 24.

Tabela 35: Resultado de CDI das misturas desta pesquisa

Mistura	CDI	σ	CPs	Variação
HMA1	39	13	5	- 55%
WMA1	18	17	5	
HMA2	48	10	3	- 20%
WMA2	38	15	6	

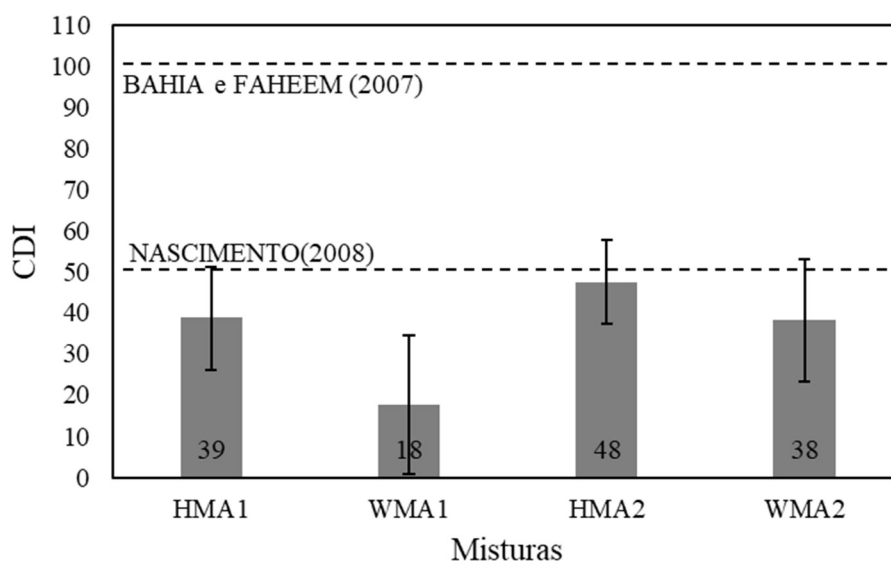


Figura 24: Resultado de CDI das misturas desta pesquisa

Segundo MAHMOUD e BAHIA (2004), valores CDI inferiores são desejáveis, porque exigem menor energia para densificar a mistura, necessitando de menos passagens de rolo compactador para atingir os vazios requeridos. Logo, pode-se relacionar a redução do CDI das misturas WMA em relação às suas respectivas HMA com a melhoria da trabalhabilidade conferida pelo uso do aditivo WMA.

Observa-se que a mistura 1, que utilizou ligante convencional, obteve uma redução de CDI da mistura quente para a morna de 55%, indicando uma melhora na trabalhabilidade da mistura morna na mesma proporção. A mistura 2, que utilizou ligante modificado, apresentou uma queda de CDI de 20%, indicando também a melhora na trabalhabilidade da mistura, mesmo que em menor proporção. Atribui-se a maior redução do CDI na mistura com ligante convencional à decisão de utilizar a mesma quantidade de aditivo de mistura morna, 2%, para os dois tipos de ligante, quando o fabricante indica uma quantidade menor para o ligante convencional.

A redução do CDI das misturas WMA em relação às suas respectivas misturas HMA, mesmo sendo compactadas em uma temperatura de 30°C inferior, comprova a eficiência do aditivo surfactante utilizado como melhorador de trabalhabilidade. CAVALCANTI (2010) também constatou que as misturas com aditivo WMA, embora produzidas e compactadas com temperaturas mais baixas apresentaram melhor trabalhabilidade, menor CDI, em relação à mistura de referência.

Quanto aos parâmetros de dosagem, todas as misturas estudadas se enquadram nos parâmetros de trabalhabilidade sugeridos por BAHIA e FAHEEM (2007) para qualquer nível de tráfego, apresentando valores máximos de CDI inferiores a 100. Porém, quando analisados os valores de CDI como indicativo de desempenho quanto à deformação permanente, nenhuma mistura atende o valor mínimo sugerido por NASCIMENTO (2008), que deve ser superior a 50, indicando baixa estabilidade do esqueleto pétreo. Porém, foram aceitas por atender o critério de TDI do mesmo autor para deformação permanente, como será mostrado a seguir.

As duas misturas HMA, bem como a mistura WMA2 não apresentam valores preocupantes em relação ao parâmetro sugerido por NASCIMENTO (2008), visto que, apesar de inferiores, ainda são valores aceitáveis e próximos do sugerido pelo autor supracitado. Já a mistura WMA1 apresenta um valor baixo de CDI, entretanto, em seu trabalho, NASCIMENTO (2008) não levou em consideração misturas mornas para a definição deste parâmetro. A influência desta redução de CDI nas misturas WMA será melhor analisada quando se comentar o ensaio de deformação permanente das misturas.

Os valores de TDI das misturas, juntamente com o desvio padrão dos mesmos, número de CPs utilizados e a variação dos índices das misturas quentes para suas respectivas misturas mornas, em função das misturas quentes, encontram-se descritos na Tabela 36 e ilustrados na Figura 25.

Tabela 36: Resultado de TDI das misturas desta pesquisa

Mistura	TDI	σ	CPs	Variação
HMA1	451	171	5	- 33%
WMA1	302	190	5	
HMA2	550	51	3	- 16%
WMA2	463	24	4	

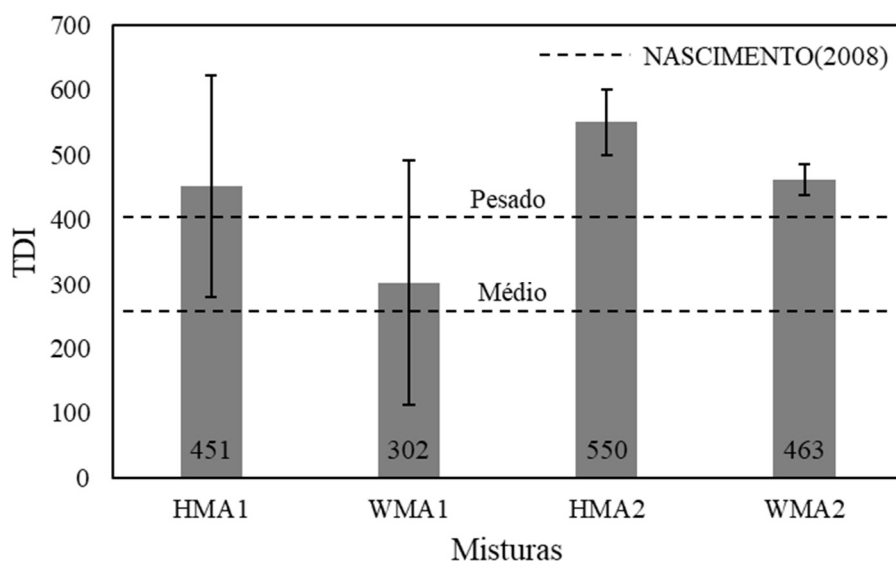


Figura 25: Resultado de TDI das misturas desta pesquisa

Observa-se que as misturas apresentaram a mesma tendência que no CDI, ou seja, o TDI das misturas WMA reduziram quando comparados as suas respectivas misturas HMA, sendo que esta redução foi menor na mistura 2, que utilizou ligante modificado. A redução do TDI indica uma redução na resistência à deformação permanente durante a vida útil do pavimento.

Quanto aos parâmetros de dosagem referentes ao TDI propostos BAHIA e FAHEEM (2007), todas as misturas atendem o valor mínimo de $TDI > 400$ para tráfego leve, com exceção da mistura WMA1. Considerando os parâmetros sugeridos por NASCIMENTO (2008), todas as misturas atendem o valor mínimo para tráfego médio, $TDI > 250$ e todas, exceto WMA1, atendem o requisito mínimo para tráfego pesado, $TDI > 400$.

Porém, da mesma forma que NASCIMENTO (2008), BAHIA e FAHEEM (2007) não levaram em consideração misturas mornas na obtenção destes parâmetros e, portanto, pode ser que relacionar a redução dos valores destes índices nas misturas mornas à uma redução de desempenho quanto a deformação permanente das mesmas não seja adequado. Para melhor análise, é necessário comparar o desempenho quanto ao ensaio de deformação permanente (FN) das misturas quentes com suas respectivas misturas mornas para poder observar o efeito do aditivo surfactante e da redução de temperatura na deformação permanente das misturas. Isto será feito no subitem 4.3.4, à frente.

4.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS

Todos os corpos de prova utilizados nos ensaios de caracterização mecânica das misturas estavam dentro dos limites especificados no Capítulo 3 de diâmetro, altura e volume de vazios de seus respectivos ensaios. Os CPs que não atenderam as condições especificadas para serem ensaiados foram descartados. Para cada ensaio foram utilizados pelo menos o número mínimo de CPs especificados em normas e descritos no capítulo anterior. Os resultados apresentados correspondem a média das amostras dentro do intervalo calculado usando a distribuição t de *Student*, considerando um nível de confiança de 95%.

4.3.1 Dano por umidade induzida

O efeito da água nas misturas foi avaliado pelo ensaio de dano por umidade induzida conforme procedimento constante no item 3.6.1. Na Tabela 37 estão apresentados os resultados de resistência retida à tração (RRT) das misturas e a variação percentual entre as misturas HMA e WMA, em função da HMA. A Figura 26 ilustra os resultados de RRT das misturas, juntamente com uma linha tracejada referente ao critério mínimo que deve ser atendido.

Diante do resultado de resistência retida à tração da mistura HMA1 é possível observar que a mesma não atendeu ao critério mínimo de 80%, demonstrando problemas de adesividade agregado-ligante asfáltico. Uma das possíveis causas deste resultado pode ser o agregado utilizado, de origem granito-gnáissica. O mesmo problema foi encontrado por CAVALCANTI (2010) e BUDNY (2012), que utilizaram agregados com características semelhantes.

Tabela 37: Resultados do ensaio de dano por umidade induzida das misturas desta pesquisa

Mistura	RT média sem	RT média com	Resistência retida	Variação
	condicionamento	condicionamento	à tração	
	RT (MPa)	RTc (MPa)	RRT (%)	
HMA1	2,34	0,97	41%	+ 104%
WMA1	1,49	1,26	84%	
HMA2	1,35	1,07	79%	+ 17%
WMA2	0,94	0,87	92%	

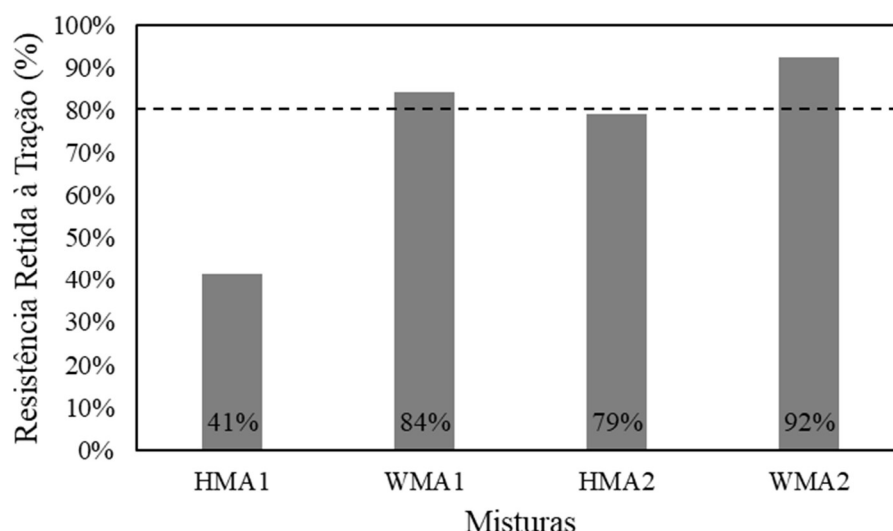


Figura 26: Resultado da resistência retida à tração (RRT) das misturas desta pesquisa

Em geral agregados básicos, como calcários e basaltos, têm maior adesividade que agregados ácidos, como granitos e gnaisses. A adesividade satisfatória pode ser conseguida mediante o emprego de pequenas percentagens de produtos melhoradores de adesividade, tais como cal extinta, pó calcário, cimento Portland e produtos industriais próprios denominados agentes melhoradores de adesividade (dopes) (PINTO e PINTO, 2015).

Comparando a mistura HMA1 com a mistura HMA2, percebe-se que a substituição do CAP 30/45 pelo AMP 60/85 já acarretou em uma melhoria de quase 100%, calculando a variação entre HMA1 e HMA2 em função da HMA2, no valor de resistência retida a tração, ficando bem próximo ao limite mínimo recomendado pela AASHTO 323-13 de $RRT > 80\%$ e atendendo o valor de 70% recomendado pela norma brasileira DNIT 031/2006.

O aditivo surfactante utilizado nesta pesquisa para a produção das misturas WMA tem como uma de suas vantagens, reconhecida em outros estudos, atender requisitos de resistência à umidade sem a necessidade de agentes *anti-stripping* adicionais, e também de acordo com o fabricante. Esta propriedade do aditivo foi verificada neste trabalho, onde as duas misturas WMA passaram a atender o valor mínimo de RRT e apresentaram melhor desempenho em relação às suas respectivas misturas HMA. Na mistura 1, o aditivo acarretou em um aumento da resistência retida a tração equivalente a 104%, na mistura 2 este aumento foi menor, de 17%, o que se deve ao fato da mistura quente já apresentar um bom valor de RRT sem o aditivo.

CAVALCANTI *et al.* (2010) avaliaram em laboratório a resistência retida à tração de misturas mornas com 2% do mesmo aditivo em comparação com uma mistura de referência em temperatura convencional. Todas as misturas mornas obtiveram valores de RRT maiores do que o limite, enquanto a mistura de referência não atingiu o critério mínimo exigido pela norma de concreto asfáltico brasileira (70%), o que indica que este aditivo também funciona como melhorador de adesividade.

Nos ensaios de dano por umidade induzida realizados por JONES *et al.* (2010), a mistura com o mesmo aditivo apresentou resistência à umidade significativamente melhor comparada com a mistura de referência neste estudo, comprovando a eficácia do produto na melhoria de adesividade.

Em sua tese, MOTTA (2011) observou que as misturas mornas não apresentaram diferenças com relação às misturas convencionais, demonstrando que o surfactante (diferente do utilizado nesta pesquisa) agiu adequadamente em todas as misturas avaliadas, mostrando a eficiência do aditivo em manter a RRT após usinagem sem sofrer degradação. O agregado utilizado no trabalho também foi do tipo granito/gnaiss.

4.3.2 Módulo de Resiliência

O ensaio para determinação do MR foi realizado conforme item 3.6.2. Na Tabela 38 mostram-se os valores de MR obtidos para cada mistura, desvio padrão dos mesmos, número de CPs utilizados e variação das misturas HMA em relação às suas respectivas WMA, em função da HMA. Estes resultados também estão ilustrados na Figura 27.

Observa-se que houve uma redução do valor do módulo de resiliência das misturas mornas em relação às suas respectivas misturas quentes, sendo esta variação mais acentuada na mistura 2, com AMP 60/85. Atribui-se esta variação, ou parte dela, ao tempo de condicionamento de duas horas para envelhecimento a curto prazo, onde as misturas mornas ficaram condicionadas à uma temperatura 30°C inferior às suas respectivas misturas quentes.

As misturas 1 quente e morna, compostas por CAP 30/45, apresentaram valores de MR significativamente mais elevados do que as misturas 2, compostas pelo AMP 60/85. Uma melhor análise destes resultados será feita no item a seguir, juntamente com os resultados de resistência à tração das misturas.

Tabela 38: Resultado de MR das misturas asfálticas desta pesquisa

Mistura	MR (MPa)	σ	CPs	Varição
HMA1	17521	999	9	- 9%
WMA1	16011	3052	8	
HMA2	9182	874	4	- 25%
WMA2	6858	1371	4	

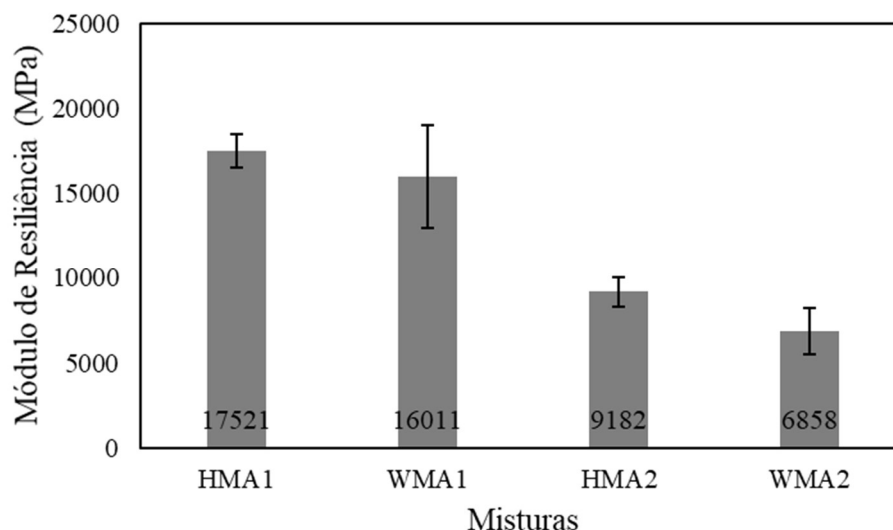


Figura 27: Resultado de MR das misturas asfálticas desta pesquisa

4.3.3 Resistência a tração indireta (RT)

O ensaio para determinação da RT foi realizado conforme item 3.6.3. Na Tabela 39 mostram-se os valores de RT obtidos para cada mistura, desvio padrão dos mesmos, número de CPs utilizados e variação das misturas HMA em relação as suas respectivas WMA, em função da HMA. Estes resultados também estão ilustrados na Figura 28.

Percebe-se que as misturas WMA apresentaram valores de RT inferiores aos de suas respectivas misturas HMA, apresentando a mesma tendência que os resultados de MR. Nota-se que valores mais elevados de RT são encontrados para as misturas com CAP 30/45, mais rígidas, associadas também aos maiores valores de MR.

Tabela 39: Resultados de RT das misturas asfálticas desta pesquisa

Mistura	RT (MPa)	σ	CPs	Varição
HMA1	2,67	0,19	3	- 19%
WMA1	2,15	0,12	5	
HMA2	1,83	0,11	3	- 27%
WMA2	1,34	0,07	3	

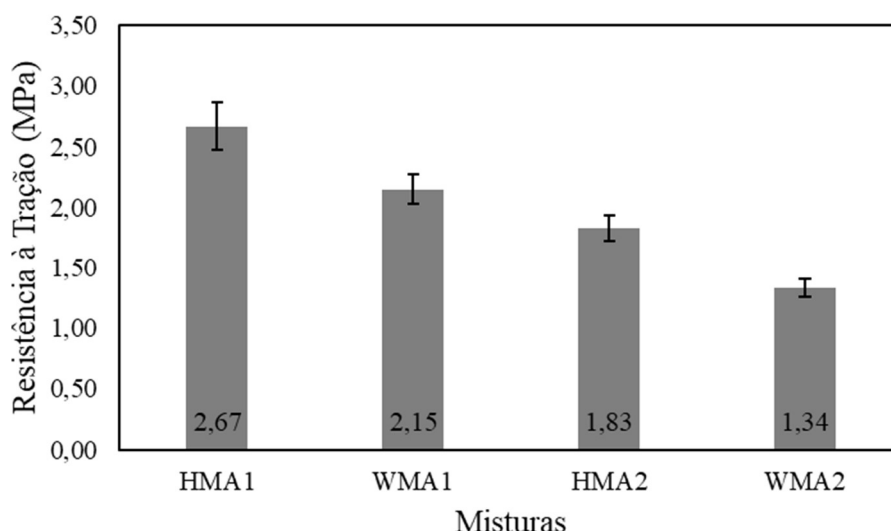


Figura 28: Resultados de RT das misturas asfálticas desta pesquisa

BUDNY (2012) constatou em sua pesquisa que valores mais elevados de RT foram encontrados para as amostras mais rígidas, associadas aos maiores valores de MR, sendo também as que foram produzidas a temperatura mais elevada. De forma geral as RT foram bem elevadas em todas as misturas de seu experimento, com o asfalto puro ou com aditivos, podendo em parte ser explicado pelo uso do ligante 30/45, que teve RT de 2,40 MPa, e pelas duas horas de envelhecimento a que foram submetidas as misturas antes da compactação.

CAVALCANTI (2010) comparou uma mistura de referência com CAP 30/45 com três misturas mornas adicionando 2% do mesmo aditivo desta pesquisa, porém dosadas em diferentes temperaturas. As misturas mornas, por consequência do aditivo, resultaram em um teor de ligante 0,3% inferior à de referência. O autor adotou o procedimento de realizar o condicionamento de 2 horas na estufa apenas para a mistura quente. A mistura quente de referência apresentou o maior valor de RT dentre as quatro misturas e o MR de todas pode ser considerado estatisticamente igual. O fato da mistura de referência quente, que foi condicionada, não ter apresentado MR maior pode ter sido influenciado pela maior quantidade de ligante em relação às misturas mornas.

JOHNSTON *et al.* (2015a) realizaram uma pesquisa sobre a influência do período de condicionamento em estufa sobre os parâmetros de dosagem de misturas asfálticas mornas. O trabalho apresenta um estudo comparativo entre duas misturas asfálticas, uma convencional à quente e uma morna com uso de aditivo surfactante, divididas em dois grupos: um grupo submetido ao período de condicionamento de duas horas e outro grupo sem. Para as misturas mornas, as amostras foram moldadas no teor de projeto da mistura quente (convencional), com mesmo teor de ligante, atendendo a metodologia atualmente utilizada. O período de condicionamento de 2 horas resultou em: acréscimo do módulo de resiliência e da resistência à tração da mistura quente, a mistura quente ficou um pouco mais rígida; a mistura morna condicionada por duas horas em estufa ficou menos rígida, apresentou módulo de resiliência menor e perdeu um pouco da resistência a tração quando comparada com a mistura morna sem condicionamento.

4.3.4 *Flow Number* (FN)

Neste item serão analisados os resultados do ensaio de FN das misturas e, também será feita uma análise comparativa dos resultados deste ensaio e dos índices de compactação giratória CDI e TDI como indicadores de possível problema de deformação permanente.

4.3.4.1 *Resultados do ensaio de Flow Number*

O ensaio de *Flow Number* foi realizado conforme item 3.6.4. Na Tabela 40 mostram-se os resultados de FN obtidos para cada mistura, o desvio padrão dos mesmos e no número de CPs utilizados. Estes resultados também estão ilustrados na Figura 29, juntamente com linhas tracejadas representando os critérios inicialmente sugeridos por NASCIMENTO (2008) para este ensaio.

As misturas HMA1 e WMA1, produzidas com o ligante convencional CAP 30/45, atendem o critério sugerido por NASCIMENTO (2008) para tráfego médio ($FN > 300$). Já as misturas HMA2 e WMA2, produzidas com ligante modificado AMP 60/85, atendem o critério mínimo recomendado para tráfego alto ($FN > 750$). Pode-se constatar, sabendo que todas as misturas têm a mesma granulometria e teor de ligante, que o uso do ligante modificado no lugar do convencional conferiu uma melhora de desempenho quanto a este ensaio de deformação permanente de mais de 100% em relação ao CAP 30/45.

Tabela 40: Resultados de *Flow Number* (FN) das misturas asfálticas desta pesquisa

Mistura	FN	σ	CPs
HMA1	345	78	7
WMA1	368	133	8
HMA2	770	210	5
WMA2	833	423	6

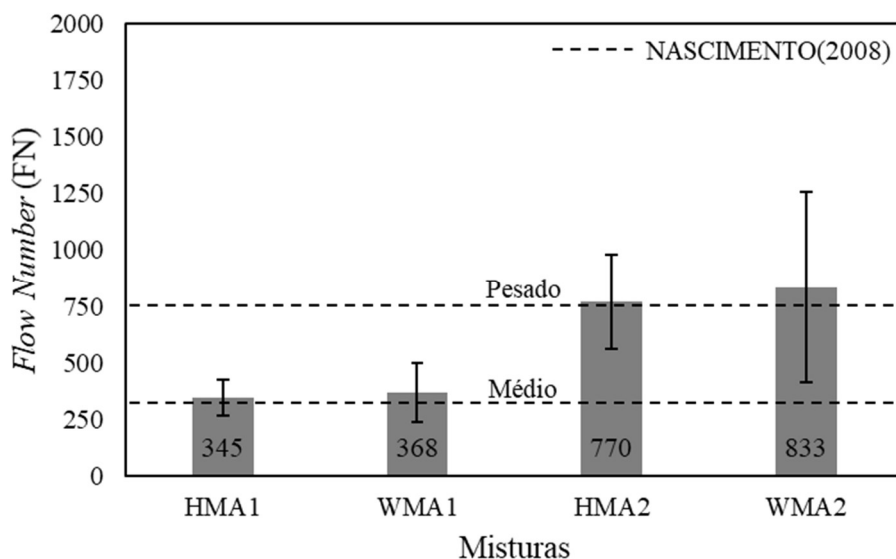


Figura 29: Resultados de *Flow Number* (FN) das misturas asfálticas desta pesquisa

Observa-se que as misturas WMA apresentaram resultados que podem ser considerados estatisticamente iguais ao de suas respectivas misturas HMA, indicando que a utilização do aditivo de mistura morna e a redução de 30°C da temperatura do agregado e de compactação da mistura não foi prejudicial ao desempenho da mesma quanto à deformação permanente.

CAVALCANTI (2010) também obteve valores muito próximos de FN para suas misturas com o mesmo aditivo WMA em relação a mistura quente de referência, sendo a mistura HMA a de menor valor. Porém, este incremento no desempenho de FN das misturas mornas pode ser explicado em função do teor de ligante, já que a mistura quente de referência apresentava um teor um pouco maior, visto que o citado autor fez dosagens para todas as misturas.

BARROS (2017) avaliou em sua pesquisa o desempenho a deformação permanente de misturas asfálticas conforme o critério de FN. Os materiais utilizados na pesquisa foram: agregados pétreos de origem basáltica e quatro diferentes ligantes asfálticos, a saber: concreto asfáltico denso - AMP 608/5-E; concreto asfáltico denso – CAP TLA 30/45; concreto asfáltico gap-graded – AB-8 (com a incorporação de cal calcítica e cal dolomítica) e concreto asfáltico denso – CAP 30/45. Os resultados mostraram que a mistura morna moldada com AMP 60/85–E teve desempenho superior às demais misturas no critério de FN.

Os resultados de FN das misturas desta pesquisa foram correlacionados, a partir de uma linha de tendência linear, com os resultados de caracterização dos ligantes utilizados, ponto de amolecimento (PA) e o parâmetro de compliância não recuperada ($J_{nr,3.2kPa}$) proveniente do ensaio de MSCR. A Figura 30 apresenta as correlações feitas bem como os coeficientes de determinação das linhas de tendência traçadas.

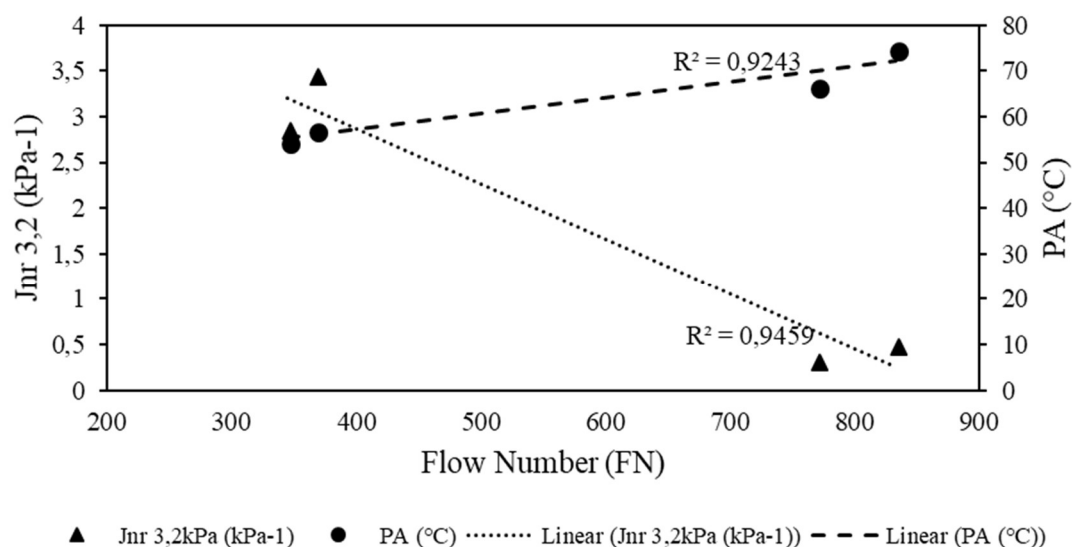


Figura 30: Correlação dos resultados de FN das misturas asfálticas com resultados de PA e MSCR dos ligantes desta pesquisa

Observa-se que tanto o ponto de amolecimento quanto o parâmetro de compliância não recuperada apresentaram elevados coeficientes de determinação, maiores que 0,90, indicando boa correlação entre estes resultados de caracterização de ligantes e o FN das respectivas misturas asfálticas. Acredita-se que a boa correlação obtida esteja relacionada as condições de contorno adotadas para as misturas estudadas, que foram executadas com agregados de mesma origem, mesma curva granulométrica e mesmo teor de ligante.

NEGRÃO (2006) constatou em sua pesquisa, que para os dois asfaltos por ele estudados (CAP 20 e CAP 40), quanto maior o teor de polímero adicionado, maior foi o ponto de amolecimento encontrado, parâmetro este, diretamente relacionado à resistência à deformação permanente da mistura, ou seja, quanto maior o ponto de amolecimento maior a resistência à deformação permanente.

Após o ensaiar uma variedade de ligantes, DUBOIS (2014) determinou que o ensaio de aligante MSCR é sensível ao desempenho da mistura asfáltica. Os ligantes com valor de compliância não recuperável (J_{nr}) inferiores a 0,5 kPa-1 apresentaram melhor desempenho em alta temperatura. Deve-se notar que o escopo deste estudo foi limitado à seleção de ligantes e muitos outros parâmetros afetam o desempenho das rodovias.

BASTOS *et al.* (2017) obtiveram baixa correlação entre os resultados de MSCR e FN, segundo os autores os resultados indicam que a caracterização do ligante, por si só, não é suficiente para estimar o comportamento de deformação permanente das misturas asfálticas correspondentes, devido ao importante papel dos agregados na mesma. As misturas estudadas apresentavam características diferentes (curva granulométrica, origem mineral do agregado, teor de ligante, vazios de ar, etc). Os autores ressaltam que, apesar da baixa correlação de MSCR e FN, os resultados ruins nos ensaios de MSCR tendem a indicar misturas com fraco desempenho (campo e laboratório).

4.3.4.2 Análise da relação dos índices de compactação giratória CDI e TDI com o FN

A partir dos resultados do ensaio de FN é possível fazer algumas ressalvas quanto a utilização dos índices CDI e TDI como critério de dosagem para a prevenção da deformação permanente. A Figura 31 apresenta o CDI, TDI e FN das misturas deste estudo de forma conjunta, para melhor comparação.

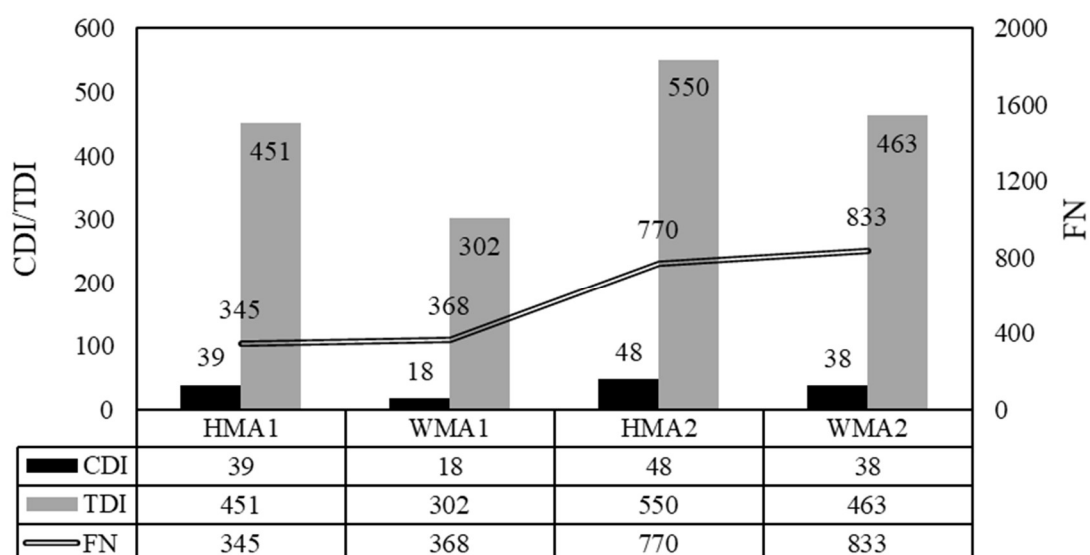


Figura 31: Comparativo entre CDI/TDI e FN das misturas asfálticas desta pesquisa

Observando o gráfico, é possível perceber que a redução dos CDI e TDI das misturas mornas em relação às suas respectivas misturas quentes não é um indicativo de piora na deformação permanente, visto que não houve redução do FN nas misturas com aditivo WMA. Logo, pode-se concluir que a redução do CDI nas misturas mornas deste trabalho indica apenas a melhora da trabalhabilidade das mesmas, conferida pelo aditivo surfactante que atua como redutor da tensão superficial. Observa-se também que o aumento do FN das misturas 2 não é indicado nas mesmas proporções pelo aumento dos índices de compactação giratória, visto que estes índices estão associados à estabilidade do esqueleto pétreo, sofrendo pouca influência do tipo ou consistência do ligante asfáltico.

Visto que NASCIMENTO (2008) não considerou misturas mornas na criação do critério de CDI ($CDI > 50$ para prevenção de deformação permanente), tais como misturas mornas deste trabalho que utilizam aditivo surfactante, nesta pesquisa atual optou-se por verificar o atendimento deste critério nas mesmas condições de contorno que o autor utilizou para criá-lo, ou seja, na mistura quente de referência. Para que isso seja possível, recomenda-se que seja executada a dosagem da mistura quente para a verificação dos parâmetros volumétricos e critérios de dosagem e, posteriormente utilizar o teor ótimo de ligante obtido nesta dosagem para a mistura morna, o que foi feito nesta pesquisa.

A seguir apresenta-se uma análise, comparando duas misturas de CAVALCANTI (2010) com as misturas 1 deste trabalho, para exemplificar a importância de se obter os parâmetros de dosagem oriundos do compactador giratório utilizando o molde correto, utilizando em conjunto na análise o CDI e o FN. Na Tabela 41, encontra-se um resumo das características das misturas que serão comparadas, onde é possível perceber que as mesmas são similares, destacando a utilização do mesmo aditivo de mistura morna nas duas pesquisas. Em sua pesquisa, o autor supracitado utilizou somente o molde de tamanho reduzido para obtenção do CDI e TDI, nesta pesquisa chamados de CDIr e TDIr.

Tabela 41: Resumo das características de misturas de CAVALCANTI (2010) e 1 desta pesquisa

Mistura	Ligante	Teor (%)	Aditivo	T comp (°C)	TMN (mm)	Faixa	CDI	CDIr	FN
HMA1	CAP	4,6	-	151	19	B	39	110	345
WMA1			2%WMA	121			18	75	368
M4***	30/45	4,9	-	150			26*	75	136
M9***		4,6	2%WMA	120			11**	46	131

*Valor calculado a partir da relação entre CDI/CDIr da mistura HMA1

**Valor calculado a partir da relação entre CDI/CDIr da mistura WMA1

*** Dados de misturas de CAVALCANTI (2010)

Como na pesquisa de Cavalcanti, foi utilizado somente o molde de tamanho reduzido para obtenção dos índices de compactação giratória, foram então estimados os valores do CDI reais das misturas quente e morna deste autor a partir da variação entre os resultados de CDI e CDIr da presente pesquisa, considerando que a variação aconteceria de forma proporcional devido à similaridade das misturas.

A Figura 32 ilustra de forma conjunta os resultados de CDI e CDIr das misturas quente e morna desta pesquisa, CDIr medido e CDI estimado das misturas quente e morna da pesquisa de CAVALCANTI (2010) e FN destas quatro misturas. As escalas do eixo Y do gráfico, referentes ao CDI/CDIr (esquerda) e FN (direita) foram ajustadas, de forma que a linha tracejada represente ao mesmo tempo o valor mínimo de CDI recomendado por NASCIMENTO (2008) para uma boa resistência a deformação permanente ($CDI > 50$) e o valor mínimo, estipulado pelo mesmo autor, de FN para um tráfego médio ($FN > 300$).

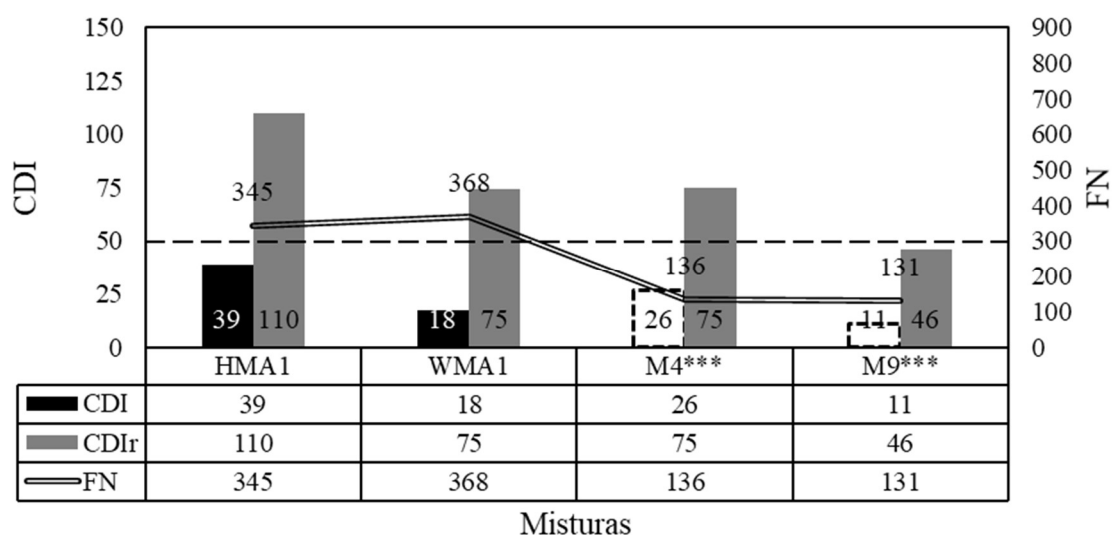


Figura 32: Comparativo do CDI e FN desta pesquisa e de CAVALCANTI (2010)

Observa-se coerência nos dados ilustrados no gráfico. Para os dois autores os valores de FN não variaram muito da mistura quente para a respectiva mistura morna e houve uma queda de CDI das misturas quentes para as mornas, indicando melhora da trabalhabilidade e não alteração da deformação permanente nos dois casos.

Conforme foi constatado anteriormente, o CDI da mistura quente é que deve ser levado em consideração para o atendimento do parâmetro de deformação permanente. CAVALCANTI (2010) obteve um CDI acima do recomendado, porém através do corpo de prova de dimensão reduzida, onde o valor estimado de CDI para a dimensão correta corresponde a praticamente metade do valor mínimo recomendado por NASCIMENTO (2008), o que está coerente com o baixo FN obtido para estas misturas.

O CDI da mistura quente desta pesquisa, apesar de um pouco inferior ao recomendado por NASCIMENTO (2008), correspondeu a um FN que atende próximo ao limite inferior ao valor recomendado para um tráfego médio. Percebe-se, comparando os valores medidos de CDIr das duas pesquisas, que o valor de CAVALCANTI (2010) foi inferior ao da mistura desta pesquisa, o que acarretou em um valor também inferior de FN. Portanto, a utilização do molde pequeno gerou um aumento do índice, não sendo possível perceber durante a dosagem a tendência da baixa resistência a deformação permanente da curva granulométrica adotada por CAVALCANTI (2010), evidenciando a importância da obtenção dos parâmetros CDI na dimensão correta do corpo de prova, para não gerar uma análise equivocada.

4.3.5 Fadiga (Tração indireta por compressão diametral)

Todas as misturas executadas neste trabalho foram ensaiadas à fadiga por compressão diametral, sendo os ensaios realizados conforme item 3.6.5. Na Figura 33 estão ilustradas as curvas obtidas das misturas ensaiadas HMA1, WMA1, HMA2 e WMA2 de N função da diferença de tensões, e na Figura 34 estão ilustradas as curvas das mesmas misturas, porém com N em função da deformação específica resiliente. A Tabela 42 apresenta os valores dos parâmetros da equação da curva de vida de fadiga das misturas, em função da diferença de tensões e em função da deformação específica resiliente, bem como o coeficiente de determinação destas curvas.

Tabela 42: Parâmetros obtidos das curvas de fadiga desta pesquisa

Mistura	Ligante	$N_{fad} = K1 \cdot \Delta\sigma^{K2}$			$N_{fad} = K1 \cdot \epsilon^{K2}$		
		K1	K2	R ²	K1	K2	R ²
HMA1	CAP 30/45	67162	-2,935	0,9869	4,02E-10	-2,935	0,9869
WMA1	CAP 30/45 + 2% de Rediset	86525	-3,543	0,9805	8,10E-13	-3,543	0,9805
HMA2	BETUFLEX 60/85	76590	-4,842	0,9816	9,16E-18	-4,842	0,9816
WMA2	BETUFLEX 60/85 + 2% de Rediset	58944	-5,579	0,9833	1,16E-20	-5,579	0,9833

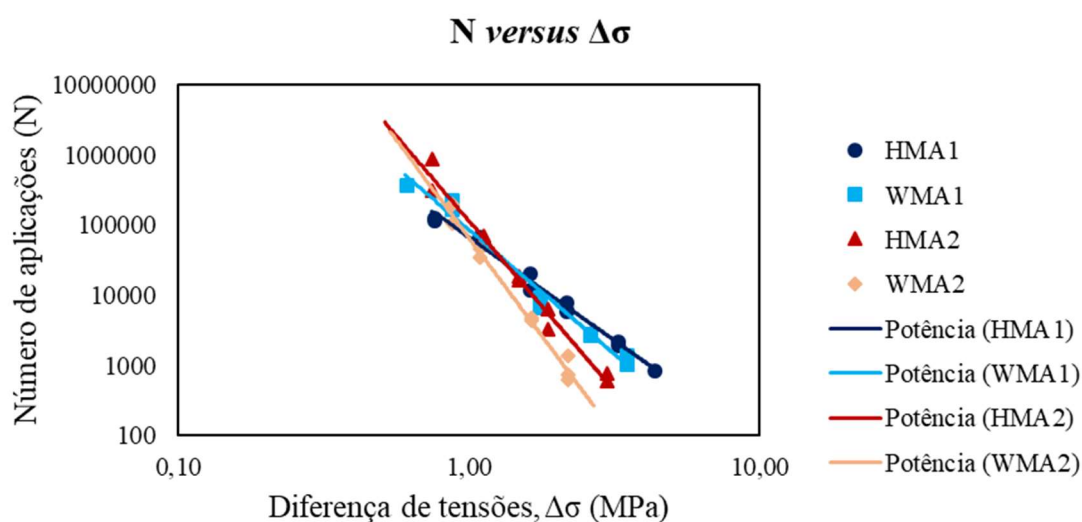


Figura 33: Curvas de fadiga das misturas (Diferença de tensões *versus* vida de fadiga)

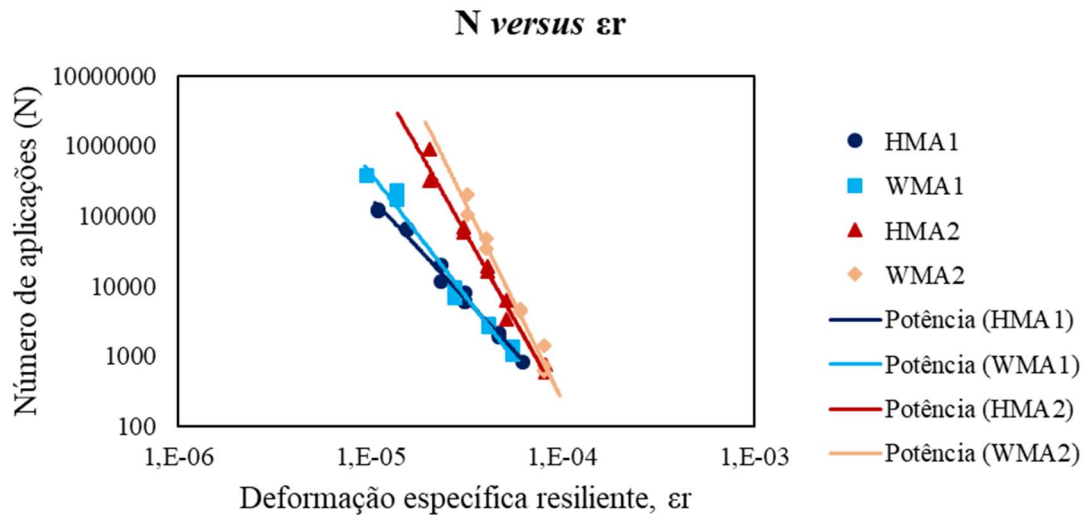


Figura 34: Curvas de fadiga das misturas (Deformação específica resiliente *versus* vida de fadiga)

É possível perceber que as curvas de fadiga são concorrentes, e que a relação entre elas tende a se inverter para deformações específicas maiores. A Figura 35 mostra melhor o ponto onde ocorre esta inversão, onde as curvas foram extrapoladas para as tensões maiores a partir das suas equações.

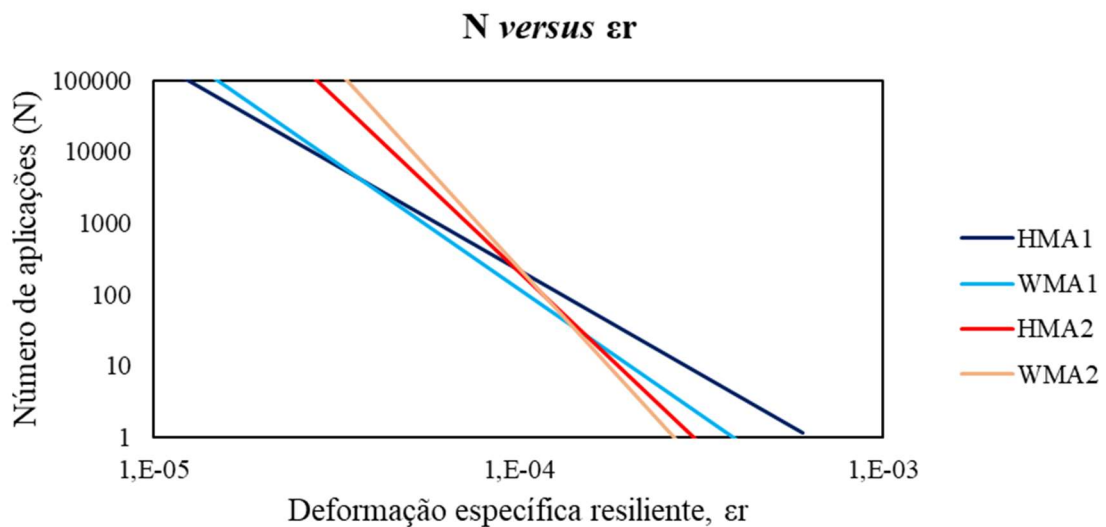


Figura 35: Curvas de fadiga extrapoladas das misturas desta pesquisa (Deformação específica resiliente *versus* vida de fadiga)

Não é trivial se analisar resultados de fadiga somente comparando as curvas ou as expressões numéricas, tanto em termos absolutos quanto em termos relativos de comparação entre misturas. Por este motivo optou-se pela análise estrutural através de simulações utilizando o programa MeDiNa.

É possível observar que as curvas de fadiga HMA2 e WMA2, que utilizaram o ligante modificado AMP 60/85, estão mais inclinadas que as misturas HMA1 e WMA1, que utilizou CAP 30/45, mais sensíveis ao estado de tensões, apresentando um k_2 mais alto.

4.4 ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural foi realizada conforme descrição do item 3.7. Para a simulação definiram-se dois níveis de tráfego e duas estruturas de camadas inferiores ao revestimento com espessuras fixas, como valores típicos, mantidos iguais para todas as análises das misturas. Assim, dimensionando a espessura das diferentes misturas a partir dos parâmetros das curvas de fadiga, é possível comparar as espessuras calculadas para as misturas utilizadas neste trabalho em diferentes situações e avaliar o comportamento das mesmas.

Foi realizada também a verificação do atendimento do valor do *Flow Number* mínimo a ser atendido como propriedade da camada asfáltica dimensionada, para as condições normal ou severa do tráfego dimensionado. Estes valores são interpolados pelo programa para as duas condições de tráfego, normal e severa, baseado nos valores apresentados na Tabela 30. A mesma interpolação foi feita para os valores de FN das misturas desta pesquisa, para encontrar os valores máximos de tráfego que cada mistura pode suportar, para condições severas e normais. Os valores máximos de tráfego que as misturas deste trabalho suportam, em função do FN estão apresentados na Tabela 43.

Tabela 43: N de serviço máximo que as misturas deste trabalho atendem em função do FN

Mistura	FN	N máximo para condições	
		Normais	Severas
HMA1	345	1,90E+07	1,90E+06
WMA1	368	2,35E+07	2,35E+06
HMA2	770	> 1,00E+08	1,14E+07
WMA2	833	> 1,00E+08	1,60E+07

4.4.1 Estrutura 1

A Estrutura 1 foi simulada para dois volumes de tráfego diferentes, N (DNIT) = $1,00 \times 10^6$ e N (DNIT) = $5,00 \times 10^6$. Os dados das camadas da Estrutura 1 considerados para o dimensionamento da camada de revestimento de mistura asfáltica seguem os mesmo materiais, espessuras e valores propostos por BUDNY (2012). Nos itens a seguir estão descritos os materiais de cada camada, suas espessuras fixas e respectivos módulos de resiliência:

- base de material granular, identificado com Brita Graduada – Gnaisse C7, com espessura de 15,0 cm, módulo de resiliência de 350 MPa e coeficiente de Poisson de 0,35;
- sub-base de material identificado como Solo Areno-argiloso LG'(2), com espessura de 20,0 cm, módulo de resiliência de 248 MPa e coeficiente de Poisson de 0,45;
- subleito identificado como Solo Siltoso NS', com módulo de resiliência de 189 MPa e coeficiente de Poisson de 0,45.

A Tabela 44 ilustra o resultado do dimensionamento do revestimento para as quatro misturas desta pesquisa, para $N = 1,00 \times 10^6$. Para este nível de tráfego o MeDiNa 2018 indica valores de FN mínimo de 104 ciclos para uma condição de tráfego normal e 300 ciclos para uma condição de tráfego severa, referentes a um N (DNIT) = $1,0 \times 10^6$.

Tabela 44: Dimensionamento do revestimento da estrutura 1 para N (DNIT) = $1,00 \times 10^6$

Parâmetros do dimensionamento N (DNIT) = $1,00 \times 10^6$	Misturas				FN mínimo	
	HMA1	WMA1	HMA2	WMA2	Condição	
					Normal	Severa
Espessura (cm)	5	5	5	5		
Área trincada (%)	5	7,2	13,4	25,7		
Deformação específica (m/m)	-1,8E-04	-1,9E-04	-2,5E-04	-2,8E-04	104	300
[ε3, p11] AEMC						

Para a estrutura 1, para o $N = 1,0 \times 10^6$, a mistura que apresentou melhor desempenho de fadiga foi a HMA1, visto que, apesar de todas apresentarem mesma espessura de revestimento, esta mistura foi a que acarretou em menor área trincada ao fim da vida útil, seguida por sua respectiva mistura morna. Nas misturas 1 e 2 é possível perceber, que para estas condições, as misturas mornas apresentaram um desempenho inferior à fadiga, resultando em maior área trincadas em relação às suas respectivas misturas a quente.

Todas as misturas atendem aos valores de FN exigido pela metodologia para condições normais e severas de tráfego, devido a que os valores obtidos nos ensaios foram maiores que os exigidos. Portanto, todas as misturas podem ser utilizadas, porém as misturas 1 apresentaram melhor resposta à fadiga e tem um custo sabidamente inferior, por ser um ligante convencional.

A Tabela 45 ilustra o resultado do dimensionamento do revestimento para as quatro misturas desta pesquisa, para um N (DNIT) = $5,0 \times 10^6$. Para este nível de tráfego o MeDiNa 2018 indica valores de FN mínimo de 209 ciclos para uma condição de tráfego normal e 575 ciclos para uma condição de tráfego severa, referentes a um N (DNIT) = $5,0 \times 10^6$.

Tabela 45: Dimensionamento do revestimento da estrutura 1 para N (DNIT) = $5,00 \times 10^6$

Parâmetros do dimensionamento N (DNIT) = $5,00 \times 10^6$	Misturas				FN mínimo	
	HMA1	WMA1	HMA2	WMA2	Condição Normal	Severa
Espessura (cm)	5,7	8,2	11,3	13,8		
Área trincada (%)	28	28,2	28,3	28,9		
Deformação específica (m/m)	-1,7E-04	-1,4E-04	-1,4E-04	-1,4E-04	209	575
[ε3, p11] AEMC						

Para a estrutura 1, para o $N = 5,0 \times 10^6$, a mistura que apresentou melhor desempenho de fadiga foi a HMA1, visto que resultou em uma menor espessura de revestimento, seguida por sua respectiva mistura morna. Nas misturas 1 e 2 é possível perceber, que para estas condições, as misturas mornas apresentaram um desempenho inferior à fadiga, resultando em camadas mais espessas.

Apesar de apresentarem melhor desempenho à fadiga para esta estrutura, as misturas moldadas com CAP 30/45, HMA1 e WMA1, só atendem o valor de FN exigido pela metodologia para condições normais de tráfego, não podendo ser utilizadas em condições severas. As misturas moldadas com AMP 60/85, HMA2 e WMA2, atendem o valor de FN exigido para as duas condições.

Para um tráfego de $N = 10^6$, DNIT (2006) estipula a utilização de tratamento superficial, o que não foi levado em consideração nas análises desta pesquisa e, portanto, uma comparação do dimensionamento mecanístico-empírico feito com o método tradicional não se aplica. Para um tráfego de $N = 5 \times 10^6$, DNIT (2006) estipula uma espessura mínima de 5 cm de revestimento betuminoso. Nenhuma das misturas deste trabalho, se aplicadas nesta espessura, atenderia a vida útil de 10 anos com menos de 30% de área trincada, acarretando na diminuição da vida útil do pavimento devido à fadiga.

4.4.2 Estrutura 2

A Estrutura 2 foi simulada para dois volumes de tráfego bem superiores, N (DNIT) = $1,00 \times 10^8$ e N (DNIT) = $2,00 \times 10^8$. Os materiais, espessuras e valores da Estrutura 2, considerados para o dimensionamento da camada de revestimento de mistura asfáltica, foram adotados pelo autor de forma a conseguir mostrar a inversão do comportamento das curvas de fadiga das misturas estudadas, devido ao fato de serem curvas concorrentes. Nos itens a seguir estão descritos os materiais de cada camada, suas espessuras fixas e respectivos módulos de resiliência:

- camada anti-reflexão de trincas, identificada como SAMI (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*), com espessura padrão de 2,5 cm, módulo de resiliência de 1500 MPa e coeficiente de Poisson de 0,25;
- base de concreto compactado a rolo (CCR), identificado como Trichês 1993 c: 120 kg/m^3 , com espessura de 25,0 cm, módulo com comportamento do tipo sigmoidal e coeficiente de Poisson de 0,25;
- sub-base de material granular, identificado como Brita Graduada – Gnaisse C7, com espessura de 20,0 cm, módulo de resiliência de 350 MPa e coeficiente de Poisson de 0,35;
- subleito identificado como Solo Siltoso NS', com módulo de resiliência de 189 MPa e coeficiente de Poisson de 0,45.

A Tabela 46 ilustra o resultado do dimensionamento do revestimento para as quatro misturas desta pesquisa, para o primeiro nível de tráfego considerado. Para este nível de tráfego o MeDiNa 2018 indica valores de FN mínimo de 750 ciclos para uma condição de tráfego normal e 1977 ciclos para uma condição de tráfego severa, referentes a um N (DNIT) = $1,0 \times 10^8$.

Tabela 46: Dimensionamento do revestimento da estrutura 2 para N (DNIT) = $1,00 \times 10^8$

Parâmetros do dimensionamento N (DNIT) = $1,00 \times 10^8$	Misturas				FN mínimo	
	HMA1	WMA1	HMA2	WMA2	Condição	
					Normal	Severa
Espessura (cm)	5	5	5	5		
Área trincada (%)	23	26,2	9	8,5	750	1977
Deformação específica (m/m) [ε3, p11] AEMC	-2,7E-05	-2,8E-05	-3,4E-05	-3,8E-05		

Para a estrutura 2, para o N = $1,0 \times 10^8$, as misturas que apresentaram melhor desempenho de fadiga foram WMA2 e HMA2, visto que, apesar de todas apresentarem a mesma espessura de revestimento que é a mínima admitida pelo programa, estas misturas foram as que acarretaram em menor área trincada ao fim da vida útil. Nas misturas 1 e 2, comparando a porcentagem de área trincada, é possível perceber que as misturas mornas apresentaram desempenho bem próximo das respectivas misturas a quentes.

Nenhuma das misturas 1 atendem os valores mínimos de FN, mesmo atendendo a vida de fadiga. As misturas 2 atendem ao FN exigido pela metodologia para condições normais de tráfego, porém o mesmo não se observa para condições severas.

A Tabela 47 ilustra o resultado do dimensionamento do revestimento para as quatro misturas desta pesquisa, para o segundo nível de tráfego. Para este nível de tráfego o MeDiNa 2018 indica valores de FN mínimo de 750 ciclos para uma condição de tráfego normal e 2000 ciclos para uma condição de tráfego severa, referentes a um N (DNIT) = $2,0 \times 10^8$.

Tabela 47: Dimensionamento do revestimento da estrutura 2 para N (DNIT) = 2,00x10⁸

Parâmetros do dimensionamento N (DNIT) = 2,00x10 ⁸	Misturas				FN mínimo	
	HMA1	WMA1	HMA2	WMA2	Condição	
					Normal	Severa
Espessura (cm)	13,8	13,8	5	5		
Área trincada (%)	28,5	28,9	22,3	20,6		
Deformação específica (m/m)					750	2000
[ε3, p11] AEMC	-3,0E-05	-3,1E-05	-3,4E-05	-3,8E-05		

Para a estrutura 2, para o N = 2,0x10⁸, as misturas que apresentaram melhor desempenho de fadiga foram WMA2 e HMA2, visto que o dimensionamento resultou em espessuras de revestimento significativamente menores quando comparadas às misturas 1. Aqui também se percebe que as misturas mornas apresentaram um comportamento muito similar às suas respectivas misturas a quente, resultando na mesma espessura dimensionada e áreas trincadas próximas.

Como já esperado, devido ao aumento no nível de tráfego em relação a situação anterior, nenhuma das misturas 1 atendem os valores mínimos de FN. As misturas 2 atendem ao FN exigido pela metodologia para condições normais de tráfego, porém o mesmo não se observa para condições severas.

4.4.3 Discussões dos resultados da análise estrutural

Após análise pelo programa MeDiNa 2018, verificou-se que os revestimentos puderam ser dimensionados utilizando as estruturas hipotéticas consideradas para os tráfegos propostos. Entretanto, os valores da espessura apresentaram resultados bastante distintos, fato já esperado devido às diferenças encontradas nas curvas de fadiga.

Observa-se que, para as diferentes estruturas e níveis de tráfego simulados, houve uma variação significativa no dimensionamento obtido. Percebe-se que houve uma inversão no comportamento de fadiga da estrutura 1 para estrutura 2, onde na primeira estrutura as misturas 1, com CAP 30/45, apresentaram melhor desempenho e, na estrutura 2, as misturas 2, com AMP 60/85, foram as que tiveram o melhor desempenho à fadiga.

Isso se explica pelo fato das curvas de fadiga serem concorrentes. As misturas moldadas com ligante modificado, AMP 60/85, foram melhores quando simuladas em uma estrutura cimentada, bastante robusta, que gerou menores deformações específicas de tração no revestimento, mesmo com tráfego superior. Na estrutura 1 as deformações específicas observadas foram maiores, na ordem de 10^{-4} , à medida que estas deformações se reduzem o comportamento das misturas se inverte. Na estrutura 2 as deformações específicas de tração na base foram da ordem de 10^{-5} . No entanto, esperava-se que o ligante modificado gerasse respostas melhores à fadiga em todas as simulações. Os resultados obtidos nestas análises são válidos para as misturas deste trabalho e nas condições de contorno adotadas. Fatores como a adoção do mesmo teor de ligante para todas as misturas e a possível baixa temperatura estipulada pelo fabricante do ligante modificado devem ser levadas em consideração. Outros resultados poderiam ser obtidos caso uma dosagem tivesse sido realizada para as misturas 2, com AMP 60/85. O ensaio de fadiga de compressão diametral com tensão controlada pode ter valorizado o ligante convencional, de modo que o desempenho do ligante modificado não compensou a rigidez muito elevada do CAP convencional utilizado nesta pesquisa.

Estudos comparativos de misturas asfálticas produzidas com ligantes modificados por polímero com aqueles não-modificados, apontam reduções significativas no afundamento de trilha de roda. O uso de modificadores possibilita ganhos no PG, os quais podem reduzir em mais de 50% a deformação permanente e proporcionar um aumento da vida de fadiga em mais de 300% (KAMEL e MILLER, 1994 apud NASCIMENTO, 2008). Ou seja, alguns aditivos podem melhorar o desempenho nas alta temperatura sem prejudicar o comportamento à fadiga nas temperaturas mais baixas. No entanto, NASCIMENTO (2008) salienta que, alguns modificadores apesar de promover ganhos nas temperaturas mais elevadas, prejudicam a durabilidade em termos de trincamento por fadiga.

No que se refere às misturas mornas, o comportamento à fadiga foi um pouco inferior do que suas respectivas misturas quentes, na maioria das análises, gerando espessuras maiores ou maior área trincada que a mistura a quente de referência.

O mesmo comportamento foi observado por CAVALCANTI (2010), porém de forma mais acentuada. O autor observou que a mistura de referência (M4) em comparação com a mistura tipo WMA compactada a temperatura 30°C inferior (M9) gerou uma diferença entre as espessuras da camada de revestimento de 7cm para manter os mesmos 10 anos de vida útil. Esta diferença é atribuída pelo autor devido a variação entre os teores de ligante, 4,9% e 4,6% na mistura de referência e na mistura morna, respectivamente.

JOHNSTON *et al.* (2015b) realizaram estudo de fadiga em laboratório de misturas asfálticas mornas com utilização de ensaios de tração indireta por compressão diametral. Neste estudo foram realizados ensaios de fadiga utilizando o equipamento de tração indireta por compressão diametral em misturas asfálticas quentes e mornas, produzidas com aditivo surfactante Evotherm, no intuito de verificar o desempenho à fadiga destas misturas, além de analisar o comportamento com condicionamento de duas horas em estufa e sem este processo. Foram avaliadas duas misturas em laboratório com condições ideais de compactação para que se pudesse verificar o efeito isolado do aditivo utilizado na mistura morna sobre o comportamento de longo prazo à fadiga deste tipo de mistura. Verificou-se um comportamento semelhante entre as misturas com vidas de fadiga bastante próximas. No que tange o efeito do condicionamento da mistura durante sua produção, também não houve efeito significativo no comportamento à fadiga das misturas com e sem as duas horas de condicionamento.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

O principal objetivo deste estudo foi verificar o efeito do aditivo surfactante de mistura morna Rediset® WMX-8017A nas propriedades mecânicas de misturas de concreto asfáltico densas a quente, utilizando um ligante convencional CAP 30/45 e um ligante modificado BETUFLEX 60/85. Para tanto, foram produzidas quatro misturas, sendo duas misturas quentes (HMA) e as mesmas modificadas com o aditivo de mistura mornas para comparação, gerando duas misturas mornas (WMA). Todas as misturas são compostas pelos mesmos agregados, mesma faixa granulométrica e mesmo teor ótimo de ligante. Foram realizados ensaios de caracterização dos agregados e dos ligantes empregados no estudo. Para avaliar as misturas foram realizados ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência, fadiga por compressão diametral, dano por umidade induzida e resistência a deformações permanentes, através do ensaio de *Flow Number*. Foram também analisados os parâmetros da curva de densificação CDI (*Compaction Densification Index*) e TDI (*Traffic Densification Index*) em duas dimensões de moldes para verificar a viabilidade da utilização do molde menor na obtenção destes parâmetros.

Embasado nos conceitos apresentados neste trabalho e na análise dos resultados obtidos, foi possível chegar às conclusões apresentadas a seguir.

5.1 CONCLUSÕES

- A classificação PG dos ligantes puros em relação aos seus respectivos ligantes modificados com 2% de aditivo WMA foi a mesma. No entanto, observaram-se pequenas variações nas propriedades medidas para a obtenção desta classificação, mas que não foram significativas ao ponto de mudar o Grau de Desempenho dos ligantes, o que indica que em termos reológicos, o aditivo de WMA estudado não alterou o ligante.
- Apesar de todos os ligantes estudados apresentarem a mesma temperatura máxima, PG 70, os AMP 60/85 apresentaram classificação significativamente melhor no parâmetro obtido pelo MSCR, indicando melhor desempenho na deformação permanente destes ligantes em relação aos CAP 30/45 puro e modificado por WMA, o que se confirmou posteriormente nos resultados de FN destas misturas e estes resultados apresentaram alta correlação entre si.

- As misturas HMA2 e WMA2, moldadas com AMP 60/85 puro e modificado por aditivo de mistura morna, apresentaram um número de fluência duas vezes maior do que o das misturas HMA1 e WMA1, moldadas com o CAP 30/45. O aditivo de mistura morna não interferiu no desempenho de deformação permanente das misturas, sendo o resultado do FN das misturas quentes considerado estatisticamente igual ao de suas respectivas misturas mornas.
- O fato da granulometria escolhida não ter se enquadrado nos parâmetros do Método Bailey, aliado ao valor de CDI um pouco inferior a 50, foram indicativos da estabilidade mediana do esqueleto pétreo. Pode-se dizer que isto foi confirmado pelo valor de FN da mistura 1, já que o aumento do mesmo na mistura 2 se deve ao uso do ligante modificado. Um melhor valor de FN poderia ter sido obtido para mistura 1, durante a dosagem, alterando a curva granulométrica, buscando atender os parâmetros de CDI de NASCIMENTO (2008) e do Método Bailey, sem a necessidade de utilização de um ligante modificado.
- As misturas deste trabalho têm CDIs marginais, porém TDIs aceitáveis. Com isso, os valores de FN encontrados estão dentro do esperado. Entretanto, é preciso considerar o efeito do ligante no FN. Se a mistura 1 fosse preparada com um CAP 50/70, os valores de FN obtidos provavelmente seriam um pouco inferiores, fazendo com que a mesma não atendesse o critério mínimo de 300 ciclos. Da mesma forma, a melhora do FN da mistura 2 se deve ao uso do ligante modificado.
- O CDI da mistura HMA2 deveria ter sido mais próximo da HMA1, já que este é um parâmetro que indica apenas a estabilidade do esqueleto pétreo, sem influência do tipo de ligante utilizado. Porém, pode ser que a temperatura de compactação da HMA2 tenha sido um pouco mais baixa do que a ideal, embora tenha sido utilizada a temperatura recomendada pelo fabricante.
- Devido a maior redução do valor de CDI da WMA em relação a HMA e consecutiva melhora na trabalhabilidade na mistura 1 se comparada com a mistura 2, pode-se concluir que o ligante convencional exige menos quantidade de aditivo de mistura morna do que o ligante modificado, conforme indica o fabricante. Logo, 2% de Rediset no ligante convencional pode ter sido excessivo.

- Misturas com aditivo WMA, embora produzidas e compactadas com temperaturas 30°C mais baixas apresentam melhor trabalhabilidade, menor CDI, em relação às misturas de referência HMA, indicando que as misturas com WMA apresentaram resultados muito bons quanto à trabalhabilidade.
- A redução dos índices oriundos do compactador giratório, CDI e TDI, das misturas mornas em relação às suas respectivas misturas quentes, com o aditivo WMA utilizado nesta pesquisa, não representa diminuição da resistência a deformação permanente, visto que o FN das misturas quentes foi mantido nas respectivas misturas mornas. Recomenda-se então, que seja executada a dosagem da mistura quente para a verificação dos parâmetros volumétricos CDI e TDI, bem como os critérios de dosagem e, posteriormente, utilizar o mesmo teor ótimo de ligante obtido na dosagem da mistura quente para a mistura morna com este tipo de aditivo.
- Os valores dos índices oriundos da curva de densificação do compactador giratório obtidos a partir de CPs moldados nos moldes de 100 e 150 mm de diâmetro são diferentes para uma mesma mistura. Os índices gerados a partir das curvas dos CPs de dimensões reduzidas, CDIr e TDIr, apresentam valores muito maiores para as mesmas misturas que seus respectivos índices, CDI e TDI, compactados com o molde de 150 mm de diâmetro.
- Tendo em vista a conclusão anterior, não se deve obter os índices utilizando CPs na dimensão reduzida, 100 mm de diâmetro, para comparação com os parâmetros de dosagem estabelecidos por BAHIA e FAHEEM (2007) e NASCIMENTO (2008).
- As misturas mornas apresentaram valores inferiores de MR e RT em relação às suas respectivas misturas a quente. Atribui-se estas variações, ou parte delas, ao tempo de condicionamento de duas horas para envelhecimento a curto prazo, onde as misturas mornas ficaram condicionadas à uma temperatura 30°C inferior às suas respectivas misturas a quente.
- O AMP 60/85 promoveu uma melhora na resistência retida a tração da mistura se comparado com o CAP 30/45. O aditivo de mistura morna melhorou nas duas misturas a resistência ao dano por umidade induzida, sendo que esta melhora foi mais significativa na HMA1 com CAP 30/45, visto que esta mistura apresentava um valor de RRT muito baixo.

- Apesar de promover ganhos nas temperaturas mais elevadas, melhorando significativamente a resistência a deformação permanente das misturas, as misturas produzidas com AMP 60/85, quente e morna, na Estrutura 1, apresentaram resultados inferiores em termos fadiga. As curvas de fadiga destas misturas, HMA2 e WMA2, ficaram muito sensíveis ao estado de tensões e apresentaram melhor comportamento à fadiga apenas em deformações específicas de tração bem baixas. Uma provável explicação para isto é o fato de ter sido adotado para estas misturas o mesmo teor de ligante dosado para a mistura referência de CAP convencional, aliado aos indícios de que as temperaturas recomendadas pelo fabricante do AMP 60/85 foram baixas. Outra, seria o fato do ensaio de fadiga de compressão diametral com tensão controlada poder ter valorizado o ligante convencional, de modo que o desempenho do ligante modificado não compensou a rigidez muito elevada do CAP convencional utilizado nesta pesquisa. Logo, estes resultados são válidos apenas para as misturas destas pesquisa, nas condições de contorno adotadas.
- Para as condições de contorno adotadas, as misturas mornas estudadas, WMA1 e WMA2, apresentaram comportamento à fadiga um pouco inferior do que suas respectivas misturas quentes na maioria das análises, gerando espessuras maiores ou maior área trincada que as misturas à quente de referência.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Realizar estudos com outros tipos de aditivos e de agregados, buscando observar se as conclusões obtidas neste estudo se aplicam em situações diferentes.
- Criar de parâmetros para os índices de compactação giratória obtidos com o CP de 100mm de diâmetro.
- Realizar estudo com o mesmo aditivo aplicado a outras composições granulométricas ajustadas conforme o método Bailey.
- Realizar análises de desempenho em campo de misturas aplicadas com o aditivo utilizado nesta pesquisa.
- Realizar ensaios para estimativa da resistência ao dano de ligantes asfálticos utilizando Varredura Linear de Amplitude de Deformação – *Linear Amplitude Sweep* (LAS), como ferramenta de previsão do desempenho à fadiga dos ligantes asfálticos estudados.

- Comparar resultados de fadiga para diferentes métodos de ensaio, como por exemplo, para o ensaio de Tração Direta.
- Calibrar ou desenvolver um procedimento padrão para a determinação das temperaturas de usinagem e compactação de misturas compostas por ligantes modificados, de modo a não ficar dependente da indicação do fabricante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO M 332-14. *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2014.
- AASHTO M 323-13. *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2013.
- AASHTO PP 64-10. *Standard method for determining aggregate source shape values from digital image analysis shape properties*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2010.
- AASHTO R 28-09. *Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2009.
- AASHTO R 30-02. *Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2002.
- AASHTO R 35-15. *Superpave Volumetric Design for Asphalt Mixtures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2015.
- AASHTO TP 81-10. *Standard method of test for determining aggregate shape properties by means of digital image analysis*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2010.
- AASHTO T 19-09. *Standard Method of Test for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2009.
- AASHTO T 195-11. *Determining Degree of Particle Coating of Asphalt Mixtures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2011.

- AASHTO T 209-12. *Theoretical Maximum Specific Gravity (Gmm) and Density of Hot Mix Asphalt (HMA)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2012.
- AASHTO T 240-09. *Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2009.
- AASHTO T 313-09. *Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2009.
- AASHTO T 315-10. *Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2010.
- AASHTO T 316-06. *Standard Method of Test for Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2006.
- AASHTO T 48-06. *Method Of Test For Flash And Fire Points By Cleveland Open Cup*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2006.
- ABNT NBR 15184. *Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.
- ABNT NBR 15617. *Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- ABNT NBR 15235. *Materiais asfálticos - Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

- ABNT NBR 15573. *Misturas asfálticas — Determinação da densidade aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.
- ABNT NBR 15619. *Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.
- ABNT NBR 16505. *Misturas asfálticas - Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.
- AKZONOBEL. *Rediset WMX*. 2011. Disponível em: < www.akzonobel.com>. Acesso em: 25 abr. 2018.
- ALMEIDA, A., LOGARAJ, S., *Surface-active Bitumen Additive for Warm Mix Asphalt with Adhesion Promoting Properties*. Akzo Nobel, Amsterdam, Holanda, 2010.
- BAHIA, H., FAHEEM, A. F., *Using the Superpave gyratory compactor to estimate rutting resistance of hot-mix asphalt*. In: Transportation Research Circular EC124 – Practical approaches to hot-mix asphalt mix design and production quality control testing, pp. 45-61, Washington, D. C., EUA, Dezembro 2007.
- BARROS, L. M., *Deformação permanente de misturas asfálticas: avaliação do desempenho pelo critério de Flow Number de misturas quentes e mornas*. Dissertação de M.Sc, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2017.
- BASTOS, J. B. S., BABADOPULOS, L. F. A. L., SOARES, J. B., “Relationship between multiple stress creep recovery (MSCR) binder test results and asphalt concrete rutting resistance in Brazilian roadways”. *Construction and Building Materials*, v. 145, pp. 20-27, Ago. 2017.
- BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B., *Pavimentação asfáltica - formação básica para engenheiros*. 4ª ed. Rio de Janeiro, PETROBRAS/ABEDA, 2010.

- BESSA, I. S., CASTELO BRANCO, V. T. F., SOARES, J. B., NOGUEIRA NETO, J. A., “Aggregate Shape properties and their influence on the behavior of hot-mix asphalt”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27, n. 7, Jul. 2015.
- BONAQUIST, R. *Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt*. NCHRP Report 691. Transportation Research Board. Washington, D.C., 2011.
- BUDNY, J. *Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas*. Dissertação de M.Sc, Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.
- CAVALLARI, J., OSBORN, L.V., SNAWDER, J.E., KRIECH, A.J., OLSEN, L.D., HERRICK, R.F., MCCLEAN, M.D. *Predictors of Dermal Exposures to Polycyclic Aromatic Compounds Among Hot-Mix Asphalt Paving Workers*. Annals of Occupational Hygiene, Oxford University Press, 2011.
- CAVALLARI, J., ZWACK, L., LANGE, C., HERRICK, R., MCCLEAN, M., *Temperature-dependent Emission Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Paving and Built-up Roofing Asphalts*. Annals of Occupational Hygiene, Oxford University Press, 2012.
- CAVALCANTI, L. S. *Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas*. Dissertação de M.Sc, Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.
- CAVALCANTI, L. S., MOTTA, L. M. G., ODA, S. *Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas tipo warm-mix com uso de aditivo surfactante*. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – IBP. 20º Encontro do Asfalto, 2010.
- CHARIWALA, A. M., PATEL, S. S., SHAIKH, M. M., TAILOR, S. A. “A Study On Warm Mix Asphalt Technology On Bituminous Mixes using Rediset-WMX”. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Gujarat Technological University, Chandkheda, Gujarat, Índia, 2016. Disponível em: <www.iosrjournals.org>. Acesso em: 27 fev. 2017.

- CONCEPA, *Análise comparativa das propriedades viscoelásticas de misturas asfálticas quentes e mornas*. Relatório final de pesquisa - CONCEPA/ANTT, Porto Alegre, RS, Brasil, Jun. 2017.
- CUNHA, M. B., *Avaliação do Método de Bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas*. Dissertação de M.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos, EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2004.
- D'ANGELO, J., HARM, E., BARTOSZEK, J., BAUMGARDNER, G., CORRIGAN, M., COWSERT, J., HARMAN, T., JAMSHIDI, M., JONES, W., NEWCOMB, D., PROWELL, B., SINES, R., YEATON, B., *Warm-mix asphalt: European practice. International Technology Scanning Program*. Federal Highway Administration, Virginia, EUA, 2008.
- DNER-ME 035/98. *Agregados - determinação da abrasão "Los Angeles"*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, 1998.
- DNER-ME 054/97. *Equivalente de areia*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, 1997.
- DNER-ME 081/98. *Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, 1998.
- DNER-ME 083/98. *Agregados – análise granulométrica: método de ensaio*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1998.
- DNER-ME 084/95. *Agregados miúdo – Determinação da densidade real*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, 1995.
- DNER-ME 384/99. *Estabilidade ao armazenamento de asfalto polímero*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, 1999.
- DNIT. *Manual de Pavimentação*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 3. ed. Rio de Janeiro, 2006.
- DNIT 031/2006 - ES. *Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006.

- DNIT 095/2006 - EM. *Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006.
- DNIT 130/2010 - ME. *Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos pelo ductilômetro – Método de Ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010.
- DNIT 131/2010 - ME. *Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola Método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010.
- DNIT 155/2010 - ME. *Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010.
- DNIT 129/2011 - EM. *Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico – Especificação de material*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2011.
- DNIT 135/2017 - ME. *Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2017.
- DNIT 136/2017 - ME. *Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral – Método de Ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2017.
- DNIT /2017 - IE. *Pavimentação – Mistura Asfáltica – Determinação dos Parâmetros CDI e TDI – Instrução de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2017.
- DNIT /2017 - ME. *Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral a tensão controlada – Método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2017.
- DNIT /2017 - ME. *Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de Ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2017.

- DNIT 178/2018 - PRO. *Pavimentação asfáltica - Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2018.
- DNIT 180/2018 - ME. *Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2018.
- DNIT IPR 747. *Diretrizes básicas para execução de misturas asfálticas mornas com o uso de aditivos surfactantes*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2018.
- DNIT. *Manual de utilização MeDiNa 2018*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2018.
- DUBOIS, E. D. *Correlation between multiple stress creep recovery (MSCR) results and polymer modification of binder*. Dissertação de M.Sc, Rowan University, Glassboro, New Jersey, USA, 2014.
- ENGELKE, D. C., KLAGENBERG, K. E., JOHNSTON, M., BRITO, L. A. T., CERATTI, J. A. P., RIBEIRO, R. Z., *Análise dos benefícios das misturas mornas com aditivo surfactante líquido*. Revista Fundações & Obras Geotécnicas, p. 52-57, 2016.
- FEITOSA, J. P. M., *Avaliação do uso de diferentes tipos de cera de carnaúba como aditivos para misturas mornas*. Tese de D.Sc, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, PETRAN, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil, 2015.
- FERNANDES JUNIOR, J. L., CUNHA, M. B., GOUVEIA, L. T., MOTTA, L. M. G., *Influência dos Agregados sobre Propriedades Mecânicas e Volumétricas de Misturas Asfálticas: Análise do Método Bailey*. In: XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Florianópolis - ANPET. Panorama Nacional da Pesquisa em Transporte, v. 1. pp. 48-52, Rio de Janeiro, 2014.

- FRITZEN, M. A., MOTTA, L. M. G., NASCIMENTO, L. A. H., CHACUR, M., *Comportamento de misturas asfálticas mornas submetidas a ensaios acelerados por simulador de tráfego móvel*. In: Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço, Fortaleza. Anais... Rio de Janeiro, ABPv, 2009.
- FRITZEN, M. A. *Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos*. Tese de D.Sc, Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.
- GENNESSEAU, M. M. L., *Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado*. Tese de D.Sc., Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2015.
- HAMZAH, M. O., GOLCHIN, B., JAMSHIDI, A., CHAILLEUX, E., “Evaluation of Rediset for use in warm-mix asphalt: a review of the literatures”. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 16, n. 9, pp. 809-831, Set. 2014.
- IBIAPINA, D. S., CASTELO BRANCO, V. T. F., DIOGENES, L. M., MOTTA, L. M. G., FREITAS, S. M., “Proposição de um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados caracterizados com o uso do processamento digital de imagens a partir de materiais oriundos do Brasil”. *Transportes*, v. 26, n. 2. No prelo 2018. Não publicado.
- INSTITUTO DE ASFALTO, *Manual de asfalto*. Ed 1989. Rio de Janeiro, IA, 2001.
- JACKSON, N.M.; CZOR, L.J. “100-mm-Diameter Mold Used with Superpave Gyratory Compactor”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, USA, 2003.
- JONES, D., TSAI, B.W., SIGNORE, J. *Warm--Mix Asphalt Study: Laboratory Test Results for AkzoNobel RedisetTM WMX*. Contract Report: UCPRC-CR-2010-01, University of California at Berkeley, Berkeley, California, USA, 2010. Disponível em: <<http://www.ucprc.ucdavis.edu/pdf/UCPRC-CR-2010-01.pdf>>. Acesso em: 25 fev. 2017.

- JOHNSTON, M. G., BOCK, A. L., BRITO, L. A. T., CERATTI, J. A. P., RIBEIRO, R. *Influência do período de condicionamento em estufa sobre os parâmetros de dosagem de misturas asfálticas mornas*. XXVIII CILA, Congresso Ibero-Latino Americano do Asfalto, Bariloche, Argentina, 16-20 Novembro, 2015a.
- JOHNSTON, M. G., COLPO, G. B., BRITO, L. A. T., CERATTI, J. A. P., RIBEIRO, R., *Estudo De Fadiga Em Laboratório De Misturas Asfálticas Mornas Com Utilização De Ensaio De Tração Indireta Por Compressão Diametral*. XXVIII CILA, Congresso Ibero-Latino Americano do Asfalto, Bariloche, Argentina, 16-20 Novembro, 2015b.
- KAMEL, N. I.; MILLER, L. J., *Comparative performance of pavement mixes containing conventional and engineered Asphalts*. In: Transportation Research Record 1454 - Transportation Research Board, Washington, D.C, EUA, 1994.
- LTP. *Misturas asfálticas para revestimentos de pavimentos produzidas com baixa energia e redução de temperatura, para diminuição de consumo energético e de emissão de poluentes*. Laboratório de Tecnologia em Pavimentação do Departamento de Engenharia de Transpostes da Escola Politécnica da Universidade De São Paulo (LTP-PTR-EPUSP), Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2010.
- MAHMOUD, A. F. F., BAHIA, H. *Using the gyratory compactor to measure mechanical stability of asphalt mixtures*. Wisconsin Highway Research Program 0092-01-02, Madison, Wisconsin, EUA, 2004.
- MARTINS, A. T., LEITE L. M., CRAVO M. C., NASCIMENTO L. A. *Fluência e relaxação sob múltipla tensão: novo teste para avaliar resistência à deformação permanente*. 16ª RPU – Reunião de Pavimentação Urbana, 2009.
- MEDINA 2018: Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos. Versão 1.0.0. [S.I.]: Felipe Augusto Cinque de Proença Franco, 2018.
- MEDINA, J., *O Ensaio de Equivalente de Areia*. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, CNPq, v. I. 52 p. Rio de Janeiro, 1962.
- MEDINA, J., MOTTA, L. M. G., *Mecânica dos pavimentos*. 3ª ed. Rio de Janeiro, Editora Interciência, 2015.

- MERIGHI, C. F., *Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu*. Dissertação de M.Sc., Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2015.
- MOCELIN, D. M., COLPO, G. B., JOHNSTON, M., BRITO, L. A. T., CERATTI, J. A. P. Análise da influência de um aditivo surfactante para misturas mornas no processo de compactação de misturas asfálticas produzidas a diferentes temperaturas. *Revista Estradas, Porto Alegre*, ano 15, n. 21, p. 52-57, Nov. 2016.
- MOTTA, R. S. *Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo*. Tese de D.Sc, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2011.
- NASCIMENTO, L. A. H. *Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente*. Dissertação de M.Sc, Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- NASCIMENTO, L. A. H., ROCHA, S. M. N., NASCIMENTO, C. E. H., KIM, Y. R., CHACUR, M., MARTINS, A. T. *Uso da mecânica do dano contínuo na caracterização de misturas asfálticas brasileiras*. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – IBP. 21º Encontro do Asfalto, 2014.
- NEGRÃO, D. P., *Estudo de asfaltos modificados por polímeros do tipo RET para aplicações em pavimentos*. Dissertação de M.Sc., Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2006.
- NEWCOMB, D., *An Introduction to Warm-Mix Asphalt*. National Asphalt Pavement Association, 2011. Disponível em: http://www.warmmixasphalt.org/submissions/4_20071125_introduction_to_warm-mix_asphalt.pdf. Acessado em: 5 fev. 2018.
- OTTO, G. G., *Misturas Asfálticas Mornas – Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo*. Dissertação de M.Sc, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PPGECC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2009.

- PAZOS, A. G., *Efeitos de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas*. Dissertação de M.Sc, Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.
- PEREIRA, R. X. L. *Misturas Betuminosas Temperadas: Estudo da Interacção Aditivo-Ligante*. Dissertação de M.Sc., Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2010.
- PÉREZ, Y. A. G., *Avaliação do desempenho mecânico e reológico de misturas asfálticas mornas*. Tese de D.Sc, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PPGECC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2013.
- PERKINS, S. W. *Synthesis of Warm Mix Asphalt Paving Strategies for Use in Montana Highway Construction*. Report N° FHWA/MT-09-009/8117-38, The State of Montana Department of Transportation in cooperation with The U.S Department of Transportation Federal Highway Administration, USA, 2009.
- PINE INSTRUMENT COMPANY, *Aggregate Image Measurement System (AIMS) – Operation Manual*. 2011.
- PINTO, S. *Materiais pétreos e concreto asfáltico: conceituação e dosagem*. Rio de Janeiro: IME, 1998.
- PINTO, S., PINTO, I. E., *Pavimentação asfáltica – conceitos fundamentais sobre materiais e revestimentos asfálticos*. 1ª ed. Rio de Janeiro, LTC, 2015.
- PROWELL B. D., HURLEY G. C., FRANK, B. *Warm-mix asphalt: best practices*. 3rd Edition. National Asphalt Pavement Association. Quality Improvement Publication 125 Lanham, 2012.
- RIVOIRE JUNIOR, L., *Avaliação de misturas mornas com emprego de simulador de tráfego linear*. Tese de D.Sc, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PPGECC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2014.
- RUBIO, M. C., MARTÍNEZ, G., BAENA, L., MORENO, F., “Warm mix asphalt: an overview”. *Journal of Cleaner Production*, v. 24, pp. 76-84, Mar. 2012.

- SOUSA FILHO, A. C., SILVEIRA, L. E. M., SANT'ANA, H. B., SOARES, J. B., *Produção e caracterização mecânica de misturas asfálticas obtidas a temperaturas intermediárias pela adição de zeólitas*. Revista Estradas, Porto Alegre, ano 6, n. 11, p. 52-57, Jun. 2007.
- VAN DIJK, W., MOREAUD, H., QUEDEVILLE, A., UGE, P. *The fatigue of bitumen and bituminous mixes*. Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologists, 38, 1972.
- VAVRIK, W. R., HUBER, G., PINE, W., CARPENTER, S. H., BAILEY, R., *Bailey method for gradation selection in HMA mixture design*, Transportation Research Board: Transportation Research Circular Number E-C044, Washington, D.C., EUA. Outubro. 2002a.
- VAVRIK, W. R., PINE, W. J., CARPENTER, S. H., *Aggregate blending for asphalt mix design – Bailey Method*. In: Transportation Research Record 1789, Transportation Research Board, pp. 146-153, Washington, D.C., EUA, 2002b.
- WARGHA FILHO, N., *Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas*. Dissertação de M.Sc, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, PETRAN, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil, 2013.
- WITCZAK, M.W., KALOUSH, K., PELLINEN, T., EL-BASYOUNY, M., VON QUINTUS, H. *Simple performance test for Superpave mix design*. NCHRP Report 465. Transportation Research Board. Washington, D.C., 2002.
- ZAUMANIS, M., *Warm mix asphalt Investigation*. Tese de Ph.D., Riga Technical University, Kgs. Lyngby, Dinamarca, 2010.
- ZUBARAN, M., *Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto*. Dissertação de M.Sc, Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.