

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Leonardo Pereira Endres

**DIMENSIONAMENTO À FADIGA DE PAVIMENTOS DE
CONCRETO ASFÁLTICO:
COMPARATIVO DOS CUSTOS ENTRE
MISTURAS MORNAS E QUENTES**

Porto Alegre
dezembro 2016

LEONARDO PEREIRA ENDRES

**DIMENSIONAMENTO À FADIGA DE PAVIMENTOS DE
CONCRETO ASFÁLTICO:
COMPARATIVO DOS CUSTOS ENTRE
MISTURAS MORNAS E QUENTES**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Washington Peres Núñez

Porto Alegre
dezembro 2016

LEONARDO PEREIRA ENDRES

**DIMENSIONAMENTO À FADIGA DE PAVIMENTOS DE
CONCRETO ASFÁLTICO:
COMPARATIVO DOS CUSTOS ENTRE
MISTURAS MORNAS E QUENTES**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado como pré-requisito para obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado pela banca e em sua forma final pelo Professor Orientador.

Porto Alegre, dezembro de 2016

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. pela UFRGS
Orientador

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti
Relator

BANCA EXAMINADORA

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. pela UFRGS

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti
DSc. pela COPPE/UFRJ

Dra. Marlova Grazziotin Johnston
Dra. pela UFRGS

Dedico este trabalho aos meus pais que sempre acreditaram e me deram total apoio em minhas decisões.

AGRADECIMENTOS

Nesta nota de agradecimento quero, de maneira mais sucinta do que deveria ser, expressar minha profunda gratidão a todos àqueles que estiveram ao meu lado nesta trajetória acadêmica que tem mais uma etapa chegando ao fim.

Agradeço aos meus pais, Miriam Rosane e Luiz Augusto, que estiveram sempre presentes e solícitos quando precisei. O apoio, incentivo e exemplo de como esta árdua etapa de aprendizado intenso é importante para meu futuro profissional e pessoal foram o que me fizeram chegar onde hoje estou. Agradeço também ao meu irmão Lucas Endres pela amizade e por inúmeras ajudas que me forneceu ao longo desses anos.

Agradeço ao meu orientador Washington Peres Núñez pela paciência e ensinamentos ao longo desta trajetória final que é o TCC; assim como à pesquisadora doutora Marlova G. Johnston e ao engenheiro Luiz Miguel Gutierrez do Grupo CCR que me forneceram ajuda e materiais permitindo o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também aos professores que fizeram parte da minha trajetória na faculdade, exigindo nunca em demasia e quase sempre na proporção correta que encarássemos os diferentes problemas com inteligência e afinco, para que hoje possamos começar a resolver sozinhos e da mesma maneira outros semelhantes, mas como engenheiros e não mais alunos.

Agradeço por fim, mas não com menor importância, aos meus amigos que nunca desistiram de me indicar que voltasse ao trabalho quando já estava cansado. Assim como souberam bem me acompanhar em ótimos momentos de descontração ao longo destes anos de faculdade.

Ao avançarmos na vida que aprendemos os limites das
nossas habilidades.

James Anthony Froude

RESUMO

Este trabalho trata do uso de tecnologias de pavimentação asfáltica que fazem uso de revestimentos asfálticos com produção a temperaturas intermediárias no Brasil. Realizando uma abordagem que inicia apresentando algumas das tecnologias existentes e disponíveis no mercado para redução da temperatura de produção das misturas quentes, seguido por uma revisão das aplicações realizadas no Brasil e em outros países. O objetivo principal do trabalho é realizar um comparativo dos custos relacionados ao uso dessas misturas. A revisão traz, então, a apresentação de outros trabalhos que tiveram objetivos semelhantes a este. A análise do custo é feita levando em consideração o tempo de vida útil do pavimento, relacionado neste caso ao número de veículos pesados que este suporta até que rompa por fadiga. São apresentados os métodos de dimensionamento e as variáveis que o influenciam, sendo depois aplicados a duas misturas, uma com e outra sem a adição de Evotherm[®] na sua composição, cujos dados têm origem em um estudo desenvolvido no LAPAV/UFRGS. O dimensionamento possibilitou o comparativo do comportamento para diferentes espessuras de estruturas utilizando cada uma das misturas como camada superficial, demonstrando com sua análise que, para espessuras elevadas, as misturas quentes se mostram mais resistentes ao rompimento à fadiga. Para espessuras esbeltas a diferença entre os valores é reduzida chegando a se inverter a partir de determinado ponto. Parte-se então para a determinação dos custos relacionados às estruturas. Levando em consideração as variações no gasto energético, na produtividade e no custo da aquisição do aditivo, o custo de produção de uma tonelada de mistura morna se mostrou mais barato que o equivalente de uma mistura quente. Os resultados obtidos no estudo apontam assim que apenas para espessuras esbeltas a relação de custo das duas soluções se mostra vantajosa para o uso de misturas mornas, para camadas mais espessas, a solução se torna inviável financeiramente.

Palavras-chave: misturas mornas; vida de fadiga; análises mecânicas; volume de tráfego; composição de custos de pavimentos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa	18
Figura 2 – Cronograma de pesquisa	19
Figura 3 – Gráfico comparativo de pavimentos com diferentes misturas	20
Figura 4 – Trincas isoladas longitudinais	33
Figura 5 – Trincas interligadas sem direção preferencial	33
Figura 6 – Equipamento para ensaio de compressão diametral	35
Figura 7 – Estado de tensões resultantes do carregamento do ensaio compressão diametral	35
Figura 8 – Curvas de fadiga das misturas	42
Figura 9 – Representação das camadas do pavimento	45
Figura 10 – Relação entre espessuras e deformações	46
Figura 11 – Relação entre espessuras e vidas de fadiga	47
Figura 12 – Integração entre os componentes do custo total do transporte	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Definição do carregamento na estrutura	43
Quadro 2 – Configuração das camadas ensaiadas	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades de projeto das misturas estudadas	41
Tabela 2 – Parâmetros das curvas de fadiga do estudo	41
Tabela 3 – Deformações das camadas	45
Tabela 4 – Vida de fadiga das camadas	47
Tabela 5 – Soluções consideradas no capítulo de custos de pavimentos	48
Tabela 6 – Custos unitários totais dos serviços analisados	54

LISTA DE SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ – Concreto betuminoso usinado a quente

CP – Corpo de prova

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

FLC – Fator Laboratório Campo

FWD – *Falling Weight Deflectometer*

GLP – Gás Liquefeito De Petróleo

HMA – *Hot Mix Asphalt*

LPAV – Laboratório de Pavimentação

MEPDG – *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*

MR – Módulo de Resiliência

NCHRP – *National Cooperative Highway Research Program*

OAE – Obra de Arte Especial

PBOT – *Portland Bureau of Transportation*

PCA – *Portland Cement Association*

RAP – Reunião Anual de Pavimentação Asfáltica

RT – Resistência a tração

SICRO – Sistema de Custos Referenciais de Obra

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VRD – Valor de Resistência à Derrapagem

WMA – *Warm Mix Asphalt*

WMV – *MeadWestvaco*

WSDOT – *Washington State Department of Transportation*

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_d = tensão de desvio aplicada repetidamente no eixo axial (MPa)

ε_r = deformação específica axial resiliente (recuperável) (mm/mm)

N_f = número de ciclos para falha por fadiga em laboratório

$N_{50\%}$ = Número de ciclos para redução de 50% do MR do CP

ε_1 = deformação inicial (mm/mm)

kg = kilograma

ton. = tonelada

m^3 = metros cúbicos

cm = centímetros

mm^{-3} = micrômetros

flc = fator laboratório campo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	16
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	16
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	16
2.2.1 Objetivo principal	16
2.2.2 Objetivo secundário	16
2.3 HIPÓTESE	16
2.4 PRESSUPOSTO	17
2.5 DELIMITAÇÕES	17
2.6 LIMITAÇÕES	17
2.7 DELINEAMENTO	17
3 ASFALTO MORNO	20
3.1 BENEFÍCIOS	20
3.2 TECNOLOGIAS EXISTENTES	21
3.2.1 Processos por espuma	21
3.2.2 Processos por aditivos orgânicos	22
3.2.3 Processos por aditivos melhoradores de adesividade e aditivos tenso ativos ..	22
3.3 PERFORMANCE EM CAMPO DOS MATERIAIS	24
3.3.1 França	24
3.3.2 Estados Unidos	25
3.3.3 Noruega	25
3.4 ESTUDOS DE CUSTOS DE OBRAS NO MUNDO	25
3.4.1 Islândia	26
3.4.2 Canadá	27
3.4.3 Estados Unidos	27
3.5 USO DA TECNOLOGIA EM TERRITÓRIO NACIONAL	28
3.5.1 Rodovia Presidente Dutra	28
3.4.2 Rodovia SP-055	29
4 ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	31
4.1 DANOS RELACIONADOS À FADIGA	32
4.2 DIMENSIONAMENTO À FADIGA	33
4.2.1 Ensaio de compressão diametral	34
4.2.2 Fatores determinantes da vida de fadiga do pavimento	36

4.2.2.1 Temperatura	36
4.2.2.2 Carregamento por eixo dos veículos	36
4.2.2.3 Períodos de descanso entre carregamentos sucessivos e selagem de trincas	36
4.2.2.5 Temperatura de usinagem do ligante e seu envelhecimento	37
4.2.3 Estimativa da vida de fadiga do pavimento	37
4.3 MÉTODOS MECANÍSTICOS DE DIMENSIONAMENTO	38
5 MISTURAS ASFÁLTICAS ANALISADAS	40
6 ANÁLISE MECANÍSTICA DAS MISTURAS ESTUDADAS	43
7. ANÁLISE DE CUSTOS DOS PAVIMENTOS DIMENSIONADOS	49
7.1 VARIANTES DO CUSTO RELACIONADAS AO USO DE MISTURAS MORNAS	51
7.1.1 Espessura da camada asfáltica	51
7.1.2 Aquisição dos aditivos para a mistura	52
7.1.3 Variação da energia para aquecimento da mistura	52
7.1.4 Produtividade das atividades	53
7.2 COMPOSIÇÕES DE CUSTO GERADAS	53
7.3 DEMAIS CONSIDERAÇÕES NO CUSTO	55
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
REFERÊNCIAS	
ANEXO A – Relatórios de análises do EVERSTRESS 5.0	
ANEXO B – Composição dos custos unitários totais	

1 INTRODUÇÃO

O uso de novas misturas no dimensionamento e execução de pavimentos de concreto asfáltico vem se difundindo na indústria da construção civil ao longo do tempo. No início dos anos 1990, iniciaram-se pesquisas na Alemanha que buscavam desenvolver misturas que exigissem menores temperaturas para aplicação que as já existentes. Este movimento permitiu avanços tecnológicos que nos levaram hoje a produzir o que se chama de *Warm Mix Asphalt* (WMA), o asfalto morno.

A nomenclatura de asfalto morno se deve ao seu diferencial em relação aos usuais concretos betuminosos usinados a quente (CBUQ). Segundo Rivoire Junior (2014), a temperatura necessária para o preparo usinado de misturas quentes encontra-se na faixa de 150°C para o ligante e 170°C para os agregados no momento em que é processado. É realizado, então, o transporte até o local da aplicação e o material deve ser espalhado e compactado a temperaturas próximas a 140°C. Com o uso da tecnologia de misturas mornas, essa temperatura pode ser reduzida em até aproximadamente 40°C, necessitando que se aqueça a mistura até em torno de 130°C na usinagem e mantenha-se para a aplicação na pista a temperatura próxima aos 100°C.

O trabalho em questão tem o objetivo de analisar a viabilidade do uso desta tecnologia no espaço brasileiro. Avaliar as vantagens relacionadas com a redução da temperatura, melhora na trabalhabilidade e das condições de trabalho de quem aplica o material, bem como considerar a necessidade de possíveis alterações nas espessuras das camadas asfálticas devido a variações nas características físicas dos materiais, como no módulo de resiliência, que se relaciona diretamente com a capacidade da estrutura a suportar esforços repetidos.

Dentre os incentivos de se avaliar a sua aplicação, se destaca a redução da temperatura de produção, permitindo que o consumo energético seja consideravelmente reduzido na fase da mistura dos materiais. Atualmente, o uso do CBUQ obriga que as usinas de concreto asfáltico estejam localizadas a relativa distância do local da obra pois, uma vez que emitem uma grande quantidade de poluentes, a legislação ambiental impede que estas se instalem próximas a centros urbanos. Há a possibilidade, então, de um melhor posicionamento estratégico destas unidades, reduzindo tanto os valores relacionados ao transporte ao encurtar as distâncias quanto as perdas energéticas da temperatura devido ao tempo de deslocamento.

Outra vantagem vem do ponto de vista do funcionário, que aplica a mistura. As altas temperaturas e os gases emanados da mesma são prejudiciais à saúde dos trabalhadores e dificultam a execução no local. Além disso, uso da nova tecnologia resulta também em melhora na trabalhabilidade do material uma vez que reduz a viscosidade dos ligantes para temperaturas semelhantes.

A aplicação de novas tecnologias no cenário nacional sempre exige que sejam realizados testes laboratoriais para a obtenção de padrões de comportamento e definir como as alterações nas técnicas construtivas irão reagir com os materiais aqui utilizados na construção. Para tal comparação, este trabalho fará uso de um experimento realizado na UFRGS no ano de 2015, que empregou um aditivo melhorador de adesividade para facilitar o cobrimento dos agregados e a trabalhabilidade a temperaturas inferiores, caracterizando assim a mistura como morna.

O comparativo fará uso de softwares para realizar o dimensionamento dos pavimentos à fadiga, testando para duas situações distintas. Uma primeira mantendo-se constante o número N de eixos padrão de carga suportado pelo pavimento e alterando-se as espessuras necessárias para tal resistência. A segunda proposta de comparação é identificar o quanto pavimentos utilizando as duas misturas e caracterizando-se por ter camadas de mesma espessura se diferem na resistência às cargas solicitadas, objetivando-se obter diferentes números N como resultados.

Após esta etapa comparativa, o trabalho tem como objetivo adquirir relações de custo para as soluções supracitadas, proporcionando com o resultado um uso prático para o dimensionamento comparativo na indústria.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: quais os efeitos no custo de execução de pavimentos de concreto asfáltico ao se utilizar misturas mornas em lugar de misturas quentes?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é realizar um comparativo dos custos de execução entre pavimentos asfálticos utilizando misturas quentes e misturas mornas na produção.

2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário do trabalho é a apresentação das estruturas dos pavimentos asfálticos utilizando misturas quentes e mornas adotando os parâmetros condicionantes estabelecidos.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que o uso de misturas mornas em pavimentos de concreto asfáltico representa um maior custo para sua execução se comparadas com estruturas utilizando misturas quentes.

2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que os ensaios e resultados presentes no estudo de Johnston et al. (2015) podem ser utilizados para comparação entre as misturas quentes e mornas.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo comparativo entre a aplicação de misturas mornas e quentes.

2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) o uso de apenas um traço de cada tipo de concreto asfáltico para a comparação, um quente e um morno;
- b) a impossibilidade de realizar a implementação das estruturas em campo a fim de encontrar o real custo das obras;
- c) o uso de apenas programas computacionais para o dimensionamento das estruturas, não se estendendo a aplicação dos materiais em campo para teste de sua resistência aos esforços reais;
- d) o uso de apenas um dos possíveis parâmetros mecânicos, a fadiga, para se comparar a resistência das estruturas;
- e) serão consideradas dentro das variáveis ambientais apenas as que podem ser relacionadas com o custo da pavimentação, como a possível redução das distâncias de transporte e a redução da emissão de poluentes na usina de concreto asfáltico relacionados ao consumo energético necessário para o aquecimento dos materiais.

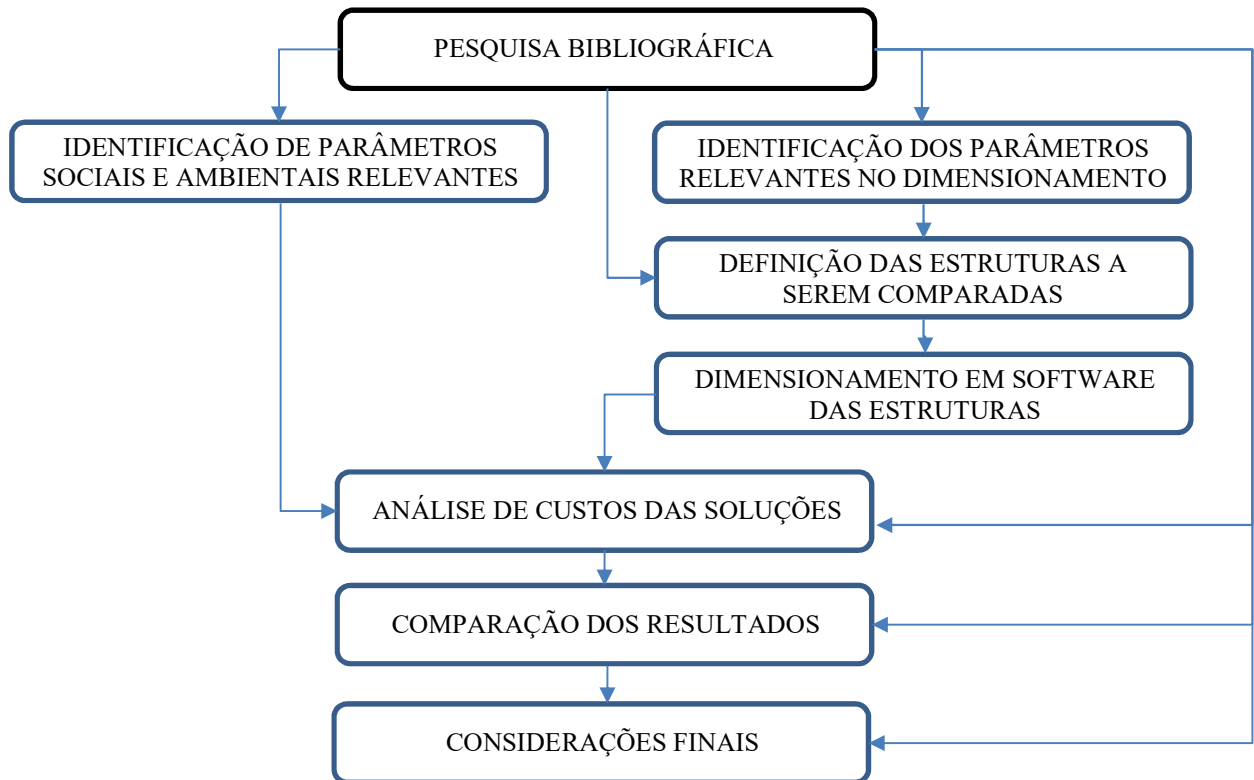
2.7 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 1 e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) identificação dos parâmetros relevantes no dimensionamento;
- c) identificação de parâmetros ambientais e sociais relevantes;
- d) definição das estruturas a serem comparadas;
- e) dimensionamento em software das estruturas;

- f) análise de custos das soluções;
- g) comparação dos resultados;
- h) considerações finais

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa



(fonte: elaborada pelo autor)

A primeira etapa colocada no diagrama, descrita como **pesquisa bibliográfica**, se estenderá por todo o desenvolvimento do trabalho e tem como objetivo o embasamento teórico e validação dos dados presentes no texto.

Em um segundo momento serão identificados os parâmetros relevantes, tanto em relação aos **impactos ambientais e sociais** causados pelo uso de dois tipos de misturas, como os parâmetros necessários para o **dimensionamento da estrutura** dos pavimentos.

Após a identificação das características mecânicas utilizadas para o dimensionamento, serão **definidas as estruturas** a serem comparadas por meio de software. Os valores dos parâmetros serão fornecidos a partir de um estudo realizado no LAPAV/UFRGS e, **utilizando um modelo computacional**, serão dimensionadas as camadas do pavimento necessárias para atender às exigências estabelecidas de resistência.

A fase de **análise dos custos das soluções** encontradas será baseada no dimensionamento estrutural realizado. Com base em tabelas de orçamentação dos órgãos públicos e dados fornecidos por profissionais do ramo, serão orçadas as estruturas a fim de identificar se para o mercado brasileiro, há diferença entre os dois métodos construtivos e se esta relação pode ser tal que apresente discrepância de valores em relação a outros países que utilizam a tecnologia, desestimulando assim o atual uso da nova técnica. Além de utilizar o dimensionamento citado, também serão levadas em conta possíveis alterações nos impactos ambientais e quais mudanças financeiras e sociais também podem ser relacionadas à inovação.

A fase final da pesquisa será, então, a **comparação dos resultados obtidos** com o uso de misturas mornas e misturas quentes e buscando nas **considerações finais**, fornecer uma comparação aplicável entre estes métodos construtivos para o meio nacional de infraestrutura.

Na figura 2 a seguir é apresentado o cronograma de pesquisa do trabalho.

Figura 2 – Cronograma de pesquisa

ETAPAS	set.	out.	nov.	dez.	ago.	set.	out.	nov.
Pesquisa bibliográfica	X	X	X	X	X	X	X	X
Identificação de parâmetros sociais e ambientais relevantes			X	X	X		X	
Identificação dos parâmetros relevantes no dimensionamento				X		X	X	
Definição das estruturas a serem comparadas				X	X	X	X	
Dimensionamento em software das estruturas					X	X	X	
Análise de custos das soluções						X	X	
Comparação dos resultados							X	X
Considerações finais								X

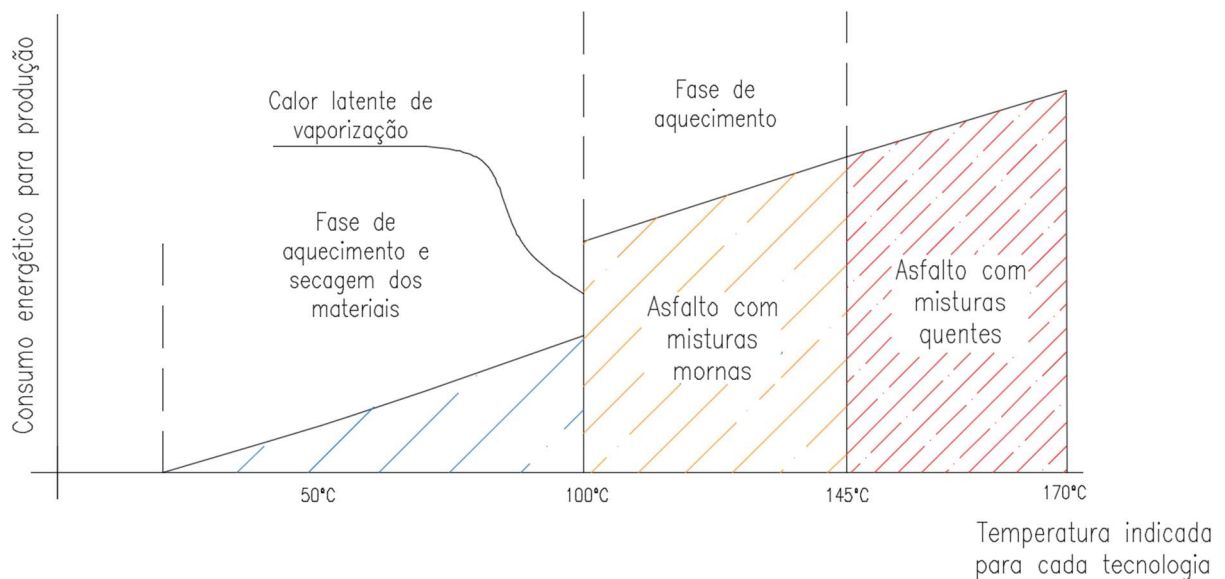
(fonte: elaborada pelo autor)

3 ASFALTO MORNO

Este capítulo tem como objetivo realizar uma abordagem a respeito de tecnologias conhecidas de concreto asfáltico produzidos a temperaturas intermediárias, também definidos como concreto asfáltico morno ou pelo nome em inglês de *Warm Mix Asphalt* (WMA). Para tal abordagem, será necessária a comparação entre estas tecnologias e as que são atualmente melhor difundidas na construção de vias de concreto asfáltico no mercado brasileiro e mundial, as que utilizam de misturas quentes na composição.

A figura 3 tem por objetivo especificar as faixas de temperatura referentes a cada uma das tecnologias estudadas, bem como realizar um comparativo quanto ao consumo energético necessário para sua produção.

Figura 3 – Gráfico comparativo de pavimentos com diferentes misturas



(fonte: elaborada pelo autor com base em D'ANGELO et al. 2008, p. 13)

3.1 BENEFÍCIOS

Os benefícios do uso desta tecnologia são abordados por D'Angelo et al. (2008) e Prowell et al. (2012) abordando características referentes tanto às variáveis ambientais como de

trabalhabilidade dos materiais. Os trabalhos foram desenvolvidos em países europeus em sua maioria e neles são destacados fatores ambientais como:

- a) redução da emissão poluentes, destacando-se decréscimos na liberação de CO₂ e CO na atmosfera;
- b) redução no consumo de energia e combustíveis. Com a variação de até 40°C em comparação aos asfaltos usinados a quente, o consumo de combustíveis na preparação pode assim ser reduzido na faixa de 20 a 35 por cento;
- c) redução no desconforto dos trabalhadores. Apesar de difícil quantificação, construtoras relataram uma melhora nas condições de trabalho e produtividade dos funcionários, destacando-se a comparação com o mastique asfáltico que necessita de temperaturas elevadas para execução.

Os pesquisadores também relacionam características físicas do pavimento como:

- a) possibilidade de executar a pavimentação a maiores distâncias da usina, mantendo-se as características necessárias de trabalhabilidade e compactação;
- b) possibilidade de compactar a mistura mais facilmente, considerando-se condições ambientais de temperatura não muito frias ou elevadas distâncias de transporte;
- c) redução do envelhecimento do ligante ao longo da vida útil do pavimento, consequência relacionada ao decréscimo na temperatura de produção do material;
- d) possibilidade de uso de percentuais maiores de RAP na composição da mistura asfáltica, ajudando na redução do envelhecimento.

3.2 TECNOLOGIAS EXISTENTES

Os processos existentes para obtenção de misturas mornas podem ser classificados de acordo com o tipo de aditivo e método utilizado na mistura. Nesta revisão bibliográfica eles estão diferenciados em três grupos que serão apresentados a seguir.

3.2.1 Processos por espuma

Processos por espuma são tecnologias baseadas no princípio de que a adição de água fria em pequenas quantidades no asfalto quente resulta na formação de vapor à pressão atmosférica, seja por meio de bico formador de espuma ou por adição de materiais hidrofílicos como as zeolitas. O processo ocorre rapidamente e faz com que a água seja incorporada à mistura

umentando o volume da mesma e assim reduzindo temporariamente a viscosidade. A redução desta permite, então, que em temperaturas inferiores, se tenha o cobrimento dos agregados e trabalhabilidade da forma adequada necessária para a aplicação em campo (D'ANGELO et al., 2008).

São indicados para o uso de água na mistura que sejam adicionados juntamente a esta, aditivos que melhorem a adesividade reduzindo a propensão de defeitos causados pela umidade na mistura (RIVOIRE JUNIOR, 2014).

São exemplos deste método os processos conhecidos comercialmente como:

- c) Advera[®];
- b) Aspha-min[®];
- a) Accu-Shear[®];
- c) ECOfoam II[®].

Os dois primeiros utilizam a adição de zeolitas na mistura e os dois últimos com misturadores mecânicos para unir a água ao CAP usado na mistura.

3.2.2 Processos por aditivos orgânicos

Os processos por aditivos orgânicos têm como princípio a adição de ceras orgânicas de cadeia longa, aquecidas até temperaturas próximas a 95°C resultando em sua mudança de estado físico para o líquido, e assim reduzindo a viscosidade do ligante e permitindo o seu uso em temperaturas abaixo das usuais (D'ANGELO et al., 2008; RIVOIRE JUNIOR, 2014).

Dentre os principais produtos desta tecnologia, se destaca o conhecido comercialmente como Sasobit[®], utilizado em mais de 20 países (D'ANGELO et al., 2008).

3.2.3 Processos por aditivos melhoradores de adesividade e aditivos tensoativos

Os processos que utilizam estes aditivos químicos são baseados em diversos efeitos que permitem o cobrimento dos agregados pelo ligante asfáltico da maneira apropriada trabalhando a temperaturas inferiores às usuais. Para sua utilização, o aditivo é adicionado ao ligante e

misturado com os agregados quentes. Um ponto relevante e comum a alguns destes aditivos é que eles não dependem da adição de água em seus componentes, evitando assim diversos problemas que a humidade poderia causar no concreto asfáltico (RIVOIRE JUNIOR, 2014).

Dentre os aditivos vendidos comercialmente internacionalmente podemos citar o Rediset® e o Evotherm®. O primeiro é um aditivo químico que combina propriedades atuando com superfície catiônica ativa e modificantes reológicos. A ação do produto se dá ao reduzir as tensões superficiais da mistura, melhorando o cobrimento e a trabalhabilidade da mistura (PROWELL, B.D. et al,2012).

O Evotherm®, é o aditivo que será utilizado na comparação das misturas em uma etapa posterior do trabalho, e por isso é apresentado uma melhor descrição dos seus processos de aplicação e propriedades. Como citado, é um aditivo que não tem em sua base ativa a adição de água e age de forma a facilitar o cobrimento dos agregados a temperaturas inferiores, aumentando também a lubrificação da mistura melhorando a trabalhabilidade e compactação. A tecnologia permite uma redução da temperatura de aquecimento dos agregados na faixa de 30 a 50°C em comparação às misturas quentes.

O Evotherm® tem como sua fórmula mais atual a conhecida como 3G e que tem como principal característica a ausência de água na mistura, havendo ainda as ET e DAT que foram criadas anteriormente, sendo a segunda mais atual e com adição de pequenas quantidades de água. A sua aplicação pode ser feita na planta de uma usina de concreto asfáltico convencional se os devidos cuidados forem tomados.

Suas instruções de uso consistem em esvaziar tanto quanto for prático o tambor de queima e mistura dos materiais antes de iniciar o uso da mistura com o aditivo, aquecer inicialmente todas as seções pelas quais o material vai passar assegurando que não haverá variações de temperatura e esta será a adequada no processo como um todo. Em seguida a temperatura dos agregados é levada até a temperatura definida para o WMA, realizando constantes averiguações quanto à temperatura, em especial nas áreas responsáveis pelo transporte da massa dentro da linha, e quanto ao suprimento energético para a bomba de injeção do aditivo.

O Evotherm® é adicionado na forma líquida de maneira semelhante aos aditivos que promovem a adesividade da mistura, podendo ser incorporado em diferentes etapas do processo de produção. O uso do aditivo exige eu a temperatura de aplicação do ligante junto ao aditivo seja

semelhante a temperatura relativa as misturas usinadas a quente, permitindo apenas a redução da temperatura dos agregados, estes sim responsáveis pelo maior consumo energético das usinas. Em usinas de planta contínua o aditivo deve ser injetado em alguma etapa entre a injeção do asfalto líquido e o tambor de mistura e aquecimento, para plantas de produção por lotes ele é injetado no funil de adição de asfalto (PROWELL et al., 2012; *NEW YORK STATE*, 2013).

3.3 PERFORMANCE EM CAMPO DOS MATERIAIS

Para a análise da viabilidade da aplicação dos materiais ao longo de sua vida útil, se faz necessária a avaliação do histórico do mesmo em outros países que já possuem experiência com o material. Prowell et al. (2012) cita que os primeiros pavimentos que passaram a incorporar tais variações para reduzir a temperatura da mistura asfáltica foram construídos na Europa a partir de 1997, e o pavimento mais antigo construído inteiramente com misturas mornas data de 1999. D'Angelo et al. (2008) definem como um consenso dentre os pesquisadores e construtores de pavimentos que a utilização do material requer que as características do mesmo devam ser tão boas quanto ou melhor que as apresentadas pelo uso de misturas quente. A seguir, são apresentados casos de uso descritos na bibliografia estrangeira.

3.3.1 França

Tanto a França como a Alemanha delimitaram que, para o uso da tecnologia, seriam requeridos procedimentos de análise das características e performance dos materiais. Assim sendo, é exigido que por meio de um controle laboratorial e em ambientes de tráfego controlado, a mistura seja propriamente testada e aprovada anteriormente a sua aplicação em campo (D'ANGELO et al., 2008). Brosseaud (2007¹ apud D'ANGELO et al., 2008) também afirma que os resultados apresentados pelos testes franceses mostraram que a trabalhabilidade do WMA apresentou melhoras, bem como a formação de trincas e a resistência à fadiga se mostraram igualmente resistentes em comparação às estruturas executadas com misturas quentes.

1 BROSSEAUD, Y. Warm Asphalt – overview in France. LCPC, France, Presentation to WMA Scan Team, 2007

Em termos de utilização em campo dos materiais, departamentos² à sudoeste de Paris utilizaram as tecnologias dos processos conhecidos comercialmente como Aspha-min[®] e ECOMAC[®] para construção de alguns trechos, bem como a cidade de Paris já apresenta diversos pontos internos de utilização, inclusive em vias exclusivas para ônibus (D'ANGELO et al., 2008).

3.3.2 Estados Unidos

De acordo com Hansen e Newcomb (2011), a utilização de misturas mornas nos Estados Unidos teve início no ano de 2004 e vem apresentando melhora na trabalhabilidade e em diversos outros critérios em comparação a pavimentos com misturas quentes. Em seu trabalho, os autores também realizaram uma pesquisa utilizando um formulário de perguntas enviado às empresas de pavimentação. Recebendo respostas referentes a cerca de 25% das plantas instaladas no país, eles estimam que a produção do material chegou a aproximadamente 19,2 milhões de toneladas em 2009 e 47,6 milhões de toneladas em 2010, apresentando como as principais tecnologias empregadas aquelas que utilizam processos de espuma na sua fabricação.

3.3.3 Noruega

D'Angelo et al. (2008) afirmam em seu trabalho que as análises de 6 diferentes pavimentos implementados na Noruega apresentaram características de revestimentos asfálticos considerados como muito bons. Foram identificados princípios de formação de rachaduras, mas nada fora do esperado para estruturas que fossem executadas com misturas quentes.

3.4 ESTUDOS DE CUSTOS DE OBRAS NO MUNDO

A fim de analisar a viabilidade da implantação de uma tecnologia, ela não deve somente estar de acordo com objetivos e características as quais se propõem, mas deve, especialmente para sua utilização em massa, ser viável e atrativa economicamente. A seguir são apresentados estudos que tinham por objetivo, assim como este trabalho em questão, analisar quais os custos relativos a diferentes implantações de soluções utilizando misturas mornas no mundo.

² A divisão administrativa do território francês é feita por departamentos.

3.4.1 Islândia

Em sua tese de mestrado, Kristjansdottir (2006) realizou um estudo comparando o custo entre pavimentos asfálticos com misturas quentes executados na Islândia e outros três métodos de construção para o mesmo país com misturas mornas: processos de espumas, zeolitas Aspha-min[®] e a cera Sasobit[®]. O autor afirma que junto ao potencial de redução energética, a partir do uso da tecnologia, devem ser considerados também os custos adicionais relativos às modificações dos equipamentos na planta e royalties aos criadores das técnicas (para o caso dos processos de espumas) ou relativos à aquisição de aditivos (no caso das zeolitas Aspha-min[®] e da cera Sasobit[®]).

Em seu trabalho, o pesquisador colheu informações relativas aos custos necessários para a implantação dos métodos. Para a adaptação do maquinário de uma usina em 2006, utilizando os processos de espumas por exemplo, seria necessário um investimento inicial de aproximadamente U\$30.000 a U\$40.000 para modificações na planta, bem como encargos referentes a royalties nos valores de U\$15.000 por empresa, U\$5.000 por planta modificada por ano e um adicional de U\$0,30 por tonelada produzida.

Para o caso das zeolitas Aspha-min[®], os desenvolvedores afirmaram que o custo da adição seria relacionado com a aquisição do material, somando aproximadamente U\$2,40 ou U\$3,60 por tonelada de concreto asfáltico produzida, não considerando no caso o transporte e a logística do produto até a usina próxima ao local da obra, que somado ao produto se estima que chegue a U\$4,00. Da mesma maneira, foi estimado o custo relativo ao emprego da solução com a cera Sasobit[®], apresentando custos entre U\$3,15 e U\$3,60 pelo produto e entrega no local da usina. Para ambos os produtos, não foram considerados ou não são necessárias alterações nas instalações para o uso.

3.4.2 Canadá

Em um trabalho apresentado no Canadá por Wakefield (2011), foram comparadas duas estruturas com uma análise de custo no decorrer de uma vida útil de 20 anos. Os pavimentos foram desenvolvidos utilizando o *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG), programa desenvolvido pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), agência americana que publica especificações, protocolos e guias de pavimentação e infraestrutura.

Na análise dos custos no trabalho, foram considerados fatores como consumo de combustíveis pelas usinas de concreto asfáltico nas duas situações e materiais necessários na construção das vias. A longo prazo se consideraram também os custos referentes intervenções preventivas para reduzir a potencialidade de danos causados deformações permanentes e rachaduras, um exemplo de uma destas ações seria a selagem de trincas quando estas são identificadas na superfície do pavimento. Os valores finais apresentados pela pesquisadora para o trecho de 4500 metros em questão foram de C\$ 1.339.149 para o pavimento utilizando misturas quentes e C\$ 1.372.141 para a solução com misturas mornas, uma diferença, então, de C\$ 32.991 a favor do uso da tecnologia tradicional de misturas quentes.

3.4.3 Estados Unidos

A PCA (*Portland Cement Association*, 2014) apresentou um estudo comparativo entre as soluções comumente utilizadas no território estadunidense. A análise levou em consideração principalmente custos relacionados com o consumo de combustíveis para o aquecimento das misturas. Como resultado se obteve que em uma comparação entre pavimentos asfálticos executados com misturas mornas e quentes e, dependendo da tecnologia utilizada dentre as 22 presentes no país, é possível uma redução variando entre 11 e 50 por cento no uso dos combustíveis para a produção das misturas. Estendendo a análise para uma aplicação em todo o território nacional e considerando o caso mais favorável de economia energética, seria possível uma redução de até U\$ 3,4 bilhões para um período de 6 anos.

O PBOT (*Portland Bureau of Transportation*, 2013) apresentou em uma análise que as plantas instaladas para a realização de pavimentação na cidade apresentaram uma redução entre 30 e 45 por cento no consumo de combustíveis quando comparadas às utilizadas anteriormente no

local. Esta redução representou uma economia de 800 toneladas de gases causadores do efeito estufa no ano de 2008, número que se comparado com a emissão gerada por automóveis, representa a retirada de 178 veículos de circulação. Referente ao custo dos aditivos necessários para a caracterização do asfalto como morno, o escritório constatou gastos de aproximadamente U\$ 4,0 por tonelada de mistura asfáltica, sem considerar gastos relacionados à adaptação da usina.

3.5 USO DA TECNOLOGIA EM TERRITÓRIO NACIONAL

Existem no território nacional diversos estudos quanto às vantagens e características mecânicas relacionadas ao emprego da tecnologia de asfalto morno, entretanto, ainda não se tem conhecimento de muitos casos de implantação da mesma. A seguir são citados alguns relatos encontrados na bibliografia quanto à implantação do material.

3.5.1 Rodovia Presidente Dutra

O emprego da tecnologia de misturas mornas em campo no Brasil tem como um exemplo a utilização da mesma em um trecho de rodovia gerido pela Concessionária CCR Nova Dutra no estado de São Paulo. Esta aplicação está descrita no trabalho desenvolvido por Motta et al. (2011a) e trata-se de um trecho experimental no km 225 da Rodovia Presidente Dutra, próximo à cidade de Guarulhos, na faixa 1 e apresentando tráfego considerado muito pesado.

Na condição inicial da via antes da aplicação das misturas mornas, a mesma apresentava como defeitos trincas longitudinais e transversais longas. Quanto às deflexões foram consideradas dentro dos limites máximos calculados e quanto à irregularidade longitudinal levantada com perfilômetro a laser, constatou-se que estava acima dos limites permitidos em alguns trechos da extensão estudada. A partir destes resultados, definiu-se que a restauração seria composta de fresagem e recomposição de 6 cm no local.

A tecnologia então utilizada na restauração do local se enquadra na citada anteriormente como aditivos melhoradores de adesividade, ou também conhecidos como aditivos surfactantes. A pesquisa desenvolvida utilizou de agregados com composição granulométrica contínua para confecção dos corpos de prova, sendo que os resultados laboratoriais apresentaram resultados

favoráveis ao emprego de misturas de concreto asfáltico com misturas mornas. Os testes apresentaram, segundo a pesquisadora (MOTTA et al., 2011a, p. 11): “[...] no geral, comportamento semelhante ao da mistura a quente, em termos de habilidade de compactação, resistência à tração por compressão diametral, deformação permanente e dano por umidade induzida.”.

Como resultados de análises do pavimento executado, constatou-se que (MOTTA. et al., 2011a):

- a) quanto à irregularidade longitudinal, constatou-se com um novo estudo com perfilômetro a laser, após sete meses da execução da restauração, que havia sido reduzida com êxito e agora encontrava-se dentro das normas previstas;
- b) quanto à macro e microtextura superficial, constatou-se com um estudo após três meses da execução da obra, que não haviam sido atingidas as características recomendadas para pavimentos asfálticos, estas que são de 0,6 mm e 1,2 mm de altura média de faixa de areia e um valor mínimo de 47 no ensaio VRD para garantir no mínimo uma superfície rugosa. A pesquisadora neste caso recomendou que para a solução fossem utilizados materiais de granulometria com descontinuidades, aumentando assim a rugosidade do pavimento;
- c) e por fim, após oito meses da restauração, novos ensaios FWD foram realizados para a análise de deflexões no local e o resultado foi que estas se mantiveram dentro dos limites admissíveis.

3.4.2 Rodovia SP-055

O trecho em questão tem seu desenvolvimento e resultados descritos em um trabalho apresentado por Merighi et al. (2012) na 41ª Reunião Anual de Pavimentação Asfáltica (RAP). Trata-se de um trecho da SP-055, Rodovia Padre Manoel da Nóbrega, compreendido entre os quilômetros 278 e 279 da pista leste. Foram neste local executadas duas faixas utilizando misturas mornas em união à tecnologia de asfalto com adição de borracha, bem como um segmento de controle utilizando apenas o asfalto com adição de borracha.

Foram utilizados dois aditivos diferentes para a execução dos trechos experimentais. Um primeiro com uma tecnologia de produção americana chamado Evotherm® M1, que tem princípio ativo semelhante ao aditivo citado anteriormente de mesmo nome, melhorando a adesão, o cobrimento e a trabalhabilidade do ligante asfáltico a temperaturas inferiores. Neste caso de aplicação, considerando que se tratou de um trecho de testes e que as vantagens

poderiam ser potencializadas caso fossem empregadas medidas para maior produção, a redução da temperatura foi de até 50°C na usinagem, refletindo na redução de 60% do consumo médio de GLP na planta.

No segundo trecho estudado foi utilizado o ligante asfáltico conhecido comercialmente como Ecoflex[®] B 3G. Segundo Greca e Rigotto (2011), este material possui em sua composição a adição de 15% de pó de borracha, dentre outras adições que permitem a redução da temperatura de compactação em comparação com outros materiais da marca. A aplicação desta tecnologia permitiu a redução de até 25°C na temperatura de mistura, refletindo na redução de 35% do consumo médio de GLP na planta (MERIGHI et al., 2012).

Em relação à aplicação das misturas em campo, Merighi et al. (2012) ressaltam que para o uso do Evotherm[®] M1 a massa apresentou grau de compactação satisfatório, mesmo após longa espera de 6 horas e 30 minutos para aplicação em campo e com temperatura de 125°C.

4 ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

A camada de revestimento asfáltico, seja ela subdividida em quantas subcamadas foram especificadas em projeto, necessita para sua obtenção a junção dos agregados com o ligante betuminoso em proporções pré-definidas. Segundo Wakefield (2011), é de extrema importância o conhecimento de ambos os componentes. Da parte dos agregados por exemplo, é preciso conhecer características quanto à textura dos agregados graúdos e miúdos, forma dos agregados quanto a serem achatados ou alongados, bem como o percentual do material que é composto de argilas.

Bernucci et al. (2008) cita diferentes propriedades ligadas à resistência dos agregados que devem ser levadas em consideração:

- a) resistência à abrasão dos agregados. Testada por meio de um ensaio padronizado no Brasil conhecido por ensaio de abrasão Los Angeles;
- b) sanidade: é relacionada à resistência à degradação química do agregado. Para a realização deste ensaio se expõe o agregado a uma solução de sulfato de sódio ou de magnésio e se analisa o percentual de perda de massa da amostra;
- c) presença de materiais deletérios: é relacionada com a origem do material utilizado. A presença de vegetação, conchas e grumos de argila por exemplo pode danificar a mistura.

Os materiais para utilização na camada devem apresentar características compatíveis às determinadas no projeto e nas normas quanto a estes e outros critérios a fim de se obterem bons resultados finais para o pavimento.

Para a integridade e união dos agregados na camada, o material utilizado na pavimentação é o ligante betuminoso. Sendo uma subdivisão destes, asfalto é um derivado de petróleo que tem seu uso bem difundido na pavimentação sendo capaz de proporcionar forte ligação entre agregados, propriedades impermeabilizantes, resistência ao ataque de agentes químicos e apresentar boa aceitação de aditivos para alterar suas propriedades.

Quanto às suas características mecânicas, o asfalto é um material que, salvo raras exceções de carregamento e condicionamento ambiental, tem um comportamento termoviscoelástico, ou seja, apresenta deformações que variam de maneira suscetível à velocidade, ao tempo de

carregamento e à intensidade do mesmo (BERNUCCI et al., 2008). Além disso, o asfalto tem seu comportamento influenciado pelas condições ambientais e em especial pela temperatura. Bapuramani (1999) cita que, devido a sua característica viscoelástica, o ligante propicia que a rigidez da estrutura da camada como um todo seja diretamente relacionada às variáveis temperatura, espessura da camada e intensidade e frequência de carregamentos.

O objetivo de se construir uma via pavimentada com este tipo de tratamento superficial, é fornecer aos usuários uma faixa de rolamento que corresponda às expectativas de durabilidade e conforto dos usuários. Por esse motivo, é essencial que ele seja projetado, construído e conservado a fim de apresentar um nível de serventia homogêneo e compatível com a função que a via se propõe a oferecer.

A serventia do pavimento para com o motorista está diretamente ligada à integridade de sua superfície. Em vias com cobrimento em concreto asfáltico, os efeitos dos carregamentos aplicados no pavimento de forma cíclica, resultantes da passagem de veículos pesados, são que os pavimentos passam a apresentar fissuras devido à fadiga com o tempo. Pavimentos que apresentam excesso de trincas e defeitos superficiais, reduzem essa característica de conforto da via para os usuários e os danos são também relacionados com o aumento do gasto com manutenção e consumo de combustíveis dos veículos (DNIT, 2006).

4.1 DANOS RELACIONADOS À FADIGA

O dimensionamento à fadiga é relacionado com a resistência dos materiais quando solicitados de maneira cíclica. Estas solicitações são de tensão inferior à projetada para a ruptura do material, mas, devido a sua repetição, com o tempo, terminam por produzir falhas. Para o estudo deste fenômeno em pavimentos de concreto asfáltico, o esforço em questão vem a ser o carregamento aplicado pela passagem de veículos pesados sobre a área estudada. Os efeitos destrutivos da fadiga se apresentam em três estágios de fendas (DNIT, 2003):

- a) primeiro na forma de fissuras, pequenas falhas de largura capilar que ainda não causam problemas funcionais ao revestimento. Estas, devido ao estado de tensões gerado no interior da camada com o carregamento e condicionantes ambientais, tendem a progredir para as trincas;
- b) as trincas podem apresentar-se de duas formas distintas, trincas isoladas ou trincas interligadas. As isoladas decorrentes do carregamento cíclico podem ser transversais, se em direção ortogonal ao eixo da via ou longitudinais se paralelas

ao eixo. Estas fendas já passam a influenciar mais na funcionalidade do pavimento e se não reparadas tendem a progredir para trincas interligadas;

- c) a junção das trincas pode se apresentar também de duas formas. Se apresentadas com lados bem definidos são chamadas de trincas tipo “bloco” e se não tiverem direções preferenciais na sua formação, são chamadas de “couro de jacaré”. Estas podem ou não apresentar erosão acentuada nas bordas.

Figura 4 – Trincas isoladas longitudinais



(fonte: BERNUCCI et al. 2008, p. 417)

Figura 5 – Trincas interligadas sem direção preferencial



(fonte: BERNUCCI et al. 2008, p. 418)

Uma vez que os danos resultantes de carregamentos cíclicos sem o devido cuidado com a manutenção da camada superior podem ocasionar a inutilização da via, o estudo do dimensionamento dos pavimentos à fadiga torna-se essencial para a análise da vida útil da estrutura como um todo.

4.2 DIMENSIONAMENTO À FADIGA

Os ensaios a fim de determinar o comportamento de diferentes misturas de ligantes asfálticos, agregados e aditivos em relação aos carregamentos cíclicos, são desenvolvidos principalmente de duas maneiras. Uma primeira ensaia os corpos de prova aplicando carregamentos que

resultam em deformações semelhantes ao longo do ensaio, avaliando assim o decréscimo da reação a este carregamento por parte do corpo. A outra maneira, utilizada nos ensaios apresentados neste trabalho, trata da análise da deformação do corpo de prova ao longo do tempo considerando uma carga de magnitude constante, chamados de experimentos por tensão controlada (BABURAMANI, 1999). Define-se ainda que os ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos solicitados por uma prensa pneumática.

4.2.1 Ensaio de compressão diametral

O ensaio de compressão diametral tem o objetivo de expressar as propriedades resilientes e de ruptura por fadiga dos corpos de prova. Este procedimento permite uma análise fenomenológica do material relacionando a máxima deformação inicial (ϵ_i) e o número de solicitações que causariam uma ruptura por fadiga (N_f) (PINTO, 1991). Sendo N referente a um carregamento relacionado a um eixo simples tomado como padrão com carga de 8,2 t (DNIT, 2006)

O ensaio brasileiro considera a aplicação cíclica de duas forças concentradas e diametralmente opostas em um corpo de prova cilíndrico Marshall. Para tal, este é colocado no equipamento de maneira que dois cabeçotes nas partes superior e inferior permitam a fixação e aplicação da carga por um equipamento pneumático que o solicita numa frequência de 1 Hz. No corpo são fixados ainda os dispositivos LVDT permitindo que se meça as deformações da amostra. Estas informações são transferidas a um computador que faz a leitura dos sinais e os apresenta por meio de um *software*.

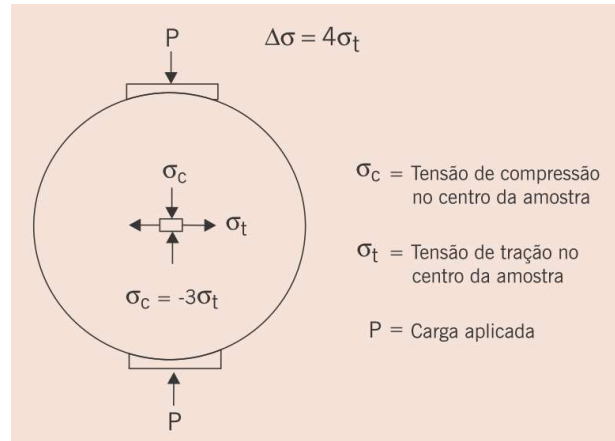
Desta maneira, o ensaio gera um estado biaxial de tensões que pode ser útil tanto na determinação do MR da mistura como os parâmetros do dimensionamento à fadiga. No decorrer do ensaio de fadiga, o carregamento resulta em um crescente de deformações devido à formação de microfissuras e fissuras no material até o rompimento completo (DNIT, 2006). Pinto (1991) indica ainda que este método de ensaio é aconselhado para estruturas com camadas asfálticas de espessuras elevadas devido à predominância de absorção das tensões pelo revestimento com relação às camadas subjacentes.

Figura 6 – Equipamento para ensaio de compressão diametral



(fonte: BERNUCCI et al. 2008, p. 313)

Figura 7 – Estado de tensões resultantes do carregamento do ensaio compressão diametral



(fonte: BERNUCCI et al. 2008, p. 314)

Este ensaio, para definição da vida útil até fadiga dos materiais, definido como sendo de tensão controlada, possui determinados pontos ao longo de sua execução que necessitam de atenção. A primeira é o controle da temperatura de ensaio devendo seguir as orientações que no Brasil indicam o uso controlado de 25° C a fim de permitir a comparação dos resultados medidos com aqueles resultantes de outros ensaios realizados previamente.

Outro ponto de destaque é a definição do momento em que devem ser considerados os valores lidos como os iniciais da deformação. As leituras têm início após 200 ciclos de aplicação da carga. Este ponto é relacionado com o fato de que inicialmente as deformações no corpo apresentam valores acentuados devido à acomodação das partes constituintes. Em campo, as camadas sofrem também pelo mesmo processo de acomodação e por isso leva-se em consideração esta etapa no ensaio.

O outro ponto do ensaio é o momento de término do mesmo, no qual se considera que o corpo veio a romper. Uma vez que a carga aplicada não tem magnitude suficiente para provocar o fissuramento completo do material, bem como devido às propriedades viscoelásticas do material, estipula-se que o rompimento ocorre quando a resistência do corpo de prova foi reduzida pela metade, seja esta indicada pelo aumento da deformação para o dobro da inicial

(BABURAMANI, 1999) ou quando o módulo de resiliência foi reduzido a 50% (JOHNSTON et al, 2015).

4.2.2 Fatores determinantes da vida de fadiga do pavimento

Existem algumas variáveis de difícil reprodução exata nos testes de laboratório e que alteram de maneira considerável a vida útil do pavimento. Devido a este tipo de variabilidade possível e esperada, é que se relaciona a impossibilidade de determinar o valor exato da resistência à fadiga das estruturas estudadas. São apresentadas a seguir algumas destas.

4.2.2.1 Temperatura

Temperaturas elevadas no ambiente de carregamento têm relação inversamente proporcional com a integridade do pavimento com o tempo. Quanto maiores as temperaturas da pista, maiores serão as deformações esperadas devido às características viscoelásticas do material, influenciando assim na rigidez da mistura, na distribuição de esforços e consequente deformação em cada seção das camadas. As acentuadas deformações dentro das camadas e entre as camadas da estrutura, aceleram o dano à fadiga e reduzem o número N equivalente (BABURAMANI, 1999).

4.2.2.2 Carregamento por eixo dos veículos

A carga aplicada e a pressão de contato dos pneus com a via têm relação inversamente proporcional com o Nf. A sobrecarga aumenta as deformações em todas as camadas do pavimento, solicitando as fibras tanto a tração como a compressão, podendo com o tempo e frequência elevar as deformações permanentes formando as chamadas trilhas de roda ou romper as camadas pela tensão de tração. Quanto mais esbeltas forem as camadas asfálticas, maiores serão os efeitos sobre a estrutura como um todo.

4.2.2.3 Períodos de descanso entre carregamentos sucessivos e selagem de trincas

Os carregamentos que solicitam os pavimentos são intermitentes e variáveis, seja em velocidade, magnitude ou distribuição de carga entre os eixos dos veículos. Durante os períodos de descanso, há o relaxamento das tensões e recuperação por meio de selagem química das microfissuras já formadas na massa do ligante. Este processo contínuo de selagem prolonga o início dos danos relacionados a fadiga (BABURAMANI, 1999).

4.2.2.5 Temperatura de usinagem do ligante e seu envelhecimento

O envelhecimento de misturas asfálticas nas fases iniciais decorre dos processos que o ligante passa nas fases de usinagem e compactação da mistura. Os principais processos envolvem a perda de componentes voláteis e a reação química do asfalto com o oxigênio do ar, diminuindo a penetração e aumentando o ponto de amolecimento e a viscosidade. Apesar de aumentar a resistência a tração, o processo nem sempre é benéfico pois o pavimento perde a sua flexibilidade (BERNUCCI et al., 2008). Este tópico é diretamente relacionado ao estudo de misturas mornas pois a redução da temperatura implica também na redução dos efeitos de envelhecimento.

4.2.3 Estimativa da vida de fadiga do pavimento

De acordo com Baburamani (1999), no processo de dimensionamento mecânico à fadiga, o parâmetro relacionado ao início e propagação de falhas é a tensão nas fibras inferiores da camada de concreto asfáltico. O estudo da formação de fissuras decorrentes desta tensão e consequente deformação é conhecido como aproximação fenomenológica e, com base em ensaios a flexão de corpos de prova dos materiais, encontra-se uma equação relacionando o número N_f de ciclos suportados por um pavimento e sua deformação inicial medida:

$$N_f = A \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \right)^b \quad (\text{fórmula 1})$$

Sendo:

N_f = número de ciclos para falha por fadiga em laboratório;

ε_1 = deformação inicial, mm/mm;

A = intercepto;

b = inclinação.

Os resultados obtidos em laboratório fornecem valores de número N para resistência do material, estes bastante inferiores aos observados em campo. A discrepância se deve aos fatores citados anteriormente e a variações em condicionantes do pavimento como o confinamento da camada dentro da estrutura e a compactação in loco.

Um modelo de previsão da vida de fadiga a ser citado é o chamado Modelo Salomão Pinto (PINTO, 1991). Este relaciona a deformação máxima embaixo do revestimento com a resistência à fadiga da seguinte forma:

$$Nf = 1,21 \times 10^{-8} (1/\varepsilon_1)^{2,66} * f_{lc} \quad (\text{fórmula 2})$$

Sendo:

f_{lc} = fator laboratório campo.

O fator laboratório campo tem a função de adequar os valores resultantes da relação entre a deformação inicial e os outros fatores. Seu valor é relacionado com o percentual de área trincada admissível e o tipo de ensaio realizado na definição, sendo neste trabalho considerado como 10^5 (PINTO, 1991).

4.3 MÉTODOS MECANÍSTICOS DE DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento dos pavimentos é feito no Brasil de duas maneiras usuais. A primeira e de mais recorrente utilização se trata da análise puramente empírica da estrutura, também conhecida como análise pelo método de dimensionamento do DNER. A segunda é a análise mecanístico-empírica, que realiza a análise utilizando de características como o MR de cada uma das camadas para identificar a sua rigidez como um todo.

O método empírico do DNER é baseado em práticas americanas do USACE (*United States Army Corps of Engineers*) e da AASHTO que têm como princípio de dimensionamento a proteção da camada de subleito da estrutura, evitando deformações plásticas excessivas. É um estudo consagrado e que traz bons resultados para os pavimentos brasileiros, uma vez que os afundamentos em trilhas de roda, patologia usual em pavimentos insuficientemente

dimensionados nesse critério, são raros nas rodovias nacionais. Entretanto, é necessário ressaltar que se trata de um dimensionamento com base experimental e que tais constatações sobre os comportamentos dos solos e camadas são referentes a análises feitas nos Estados Unidos. Este fato exige que para estudos mais acurados dos efeitos da fadiga nos pavimentos, por exemplo, haja uma complementação do dimensionamento com uso de métodos com modelos de previsão de desempenho do tipo mecanístico-empírico. (DNIT, 2006)

Estes métodos têm maior campo de aplicação e são embasados nas propriedades dos solos, materiais utilizados e na interação das camadas. Com essa análise é possível otimizar a estrutura considerando quais esforços do tráfego cada uma das camadas irá absorver e resistir. Tais modelos são constituídos por três partes (DNIT, 2006):

- a) um modelo estrutural capaz de analisar as relações de tensão por deformação das camadas com o carregamento cíclico dos veículos sobre o pavimento, identificando também deflexões elásticas capazes de originar e propagar fissuras;
- b) funções de transferência para avaliar as respostas da estrutura aos carregamentos bem como a propagação das falhas já esperadas. Esta etapa deve ter embasamento teórico, empiricamente validado segundo o conhecimento que se tem do comportamento de cada material e como os mesmos reagem à deterioração;
- c) fatores e funções de calibração com função de relacionar condições que não podem ser englobadas nas outras partes. Têm forte base empírica e experimental em sua análise, visando levar em consideração o clima, variabilidade específica do tráfego local e a variabilidade e particularidades dos materiais utilizados na obra.

Os métodos mecanístico-empíricos fazem uso de outros parâmetros que aprimoram seus resultados, como o módulo de resiliência e o coeficiente de Poisson das camadas, e por isso são utilizados neste estudo ao empregar o software EVERSTRESS 5.0 no dimensionamento.

5 MISTURAS ASFÁLTICAS ANALISADAS

A fim de analisar a relação do uso do aditivo Evotherm® com a vida útil da massa asfáltica em relação à fadiga, esta pesquisa usou os resultados de uma pesquisa realizada no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LPAV/UFRGS). O estudo foi desenvolvido por Johnston et al. (2015) e teve como objetivo comparar o comportamento à fadiga de uma mistura morna com o aditivo e uma mistura quente utilizando o ensaio de tração direta por compressão diametral.

A pesquisa utilizou como fonte de agregados minerais os materiais provenientes de uma pedreira de origem basáltica localizada no km 30 da BR-290-RS. Sendo a composição granulométrica enquadrada na faixa C do DNIT e dentro dos limites da faixa de trabalho.

O tipo de ligante foi o convencional CAP 50/70 sendo a mistura asfáltica dosada através do método Marshall para definição dos parâmetros ótimos utilizados tanto na mistura quente como na morna. A variação entre os dois tipos de misturas foi definida apenas pela aplicação de 0,4% do aditivo surfactante Evotherm® M1 proveniente da empresa WMV (*MeadWestvaco*). A adição do Evotherm® proporcionou a possibilidade de uma redução na temperatura dos agregados de aproximadamente 30°C para mistura e compactação.

O aditivo Evotherm® M1 faz parte da classificação Evotherm® 3G cujas dosagens são indicadas na faixa de 0,25 a 0,75% do peso total de ligante na mistura, sendo este total o somatório de ligante virgem mais outros que possam ser provenientes da reciclagem de camadas antigas (*NEW YORK STATE*, 2013). Assegurando assim que a porcentagem utilizada está dentro dos parâmetros esperados.

Seguindo na descrição do estudo de Johnston et al. (2015), além dos ensaios de tração indireta para compressão diametral, os materiais foram submetidos a um período de 2 horas de condicionamento em estufa. Segundo o NCHRP Report 691 (2011), esta etapa proporciona uma maior semelhança do corpo de prova com o material quando aplicado em campo, estimulando a absorção do ligante e acelerando o envelhecimento da mistura que ocorre durante a construção.

A Tabela 2 apresenta alguns dos resultados e parâmetros estabelecidos através dos ensaios de compressão diametral e análises dos CPs:

Tabela 1 – Propriedades de projeto das misturas estudadas

Propriedades	Especificações	Mistura HMA (2h)	Mistura WMA (2h)
Teor de Betumem (%)		5,7	5,7
Volume de Vazios (%)	3 a 5	4,3	4,2
Resistência a tração – RT (MPa)	>0,65	0,93	0,67
Módulo de resiliência – MR (MPa)		4034	2404

(fonte: JOHNSTON et al., 2015)

Também através do ensaio de compressão diametral, com o padrão de carregamento de 0,1 segundo de aplicação da carga seguido por um período de 0,9 segundo de repouso, e medindo progressivamente os valores com um LVDT as deformações horizontais, foram definidas as curvas de fadiga. Utilizando neste caso como parâmetro para finalização do ensaio a redução de 50% do MR inicial. Os parâmetros A (intercepto) e b (inclinação) das curvas foram definidos como:

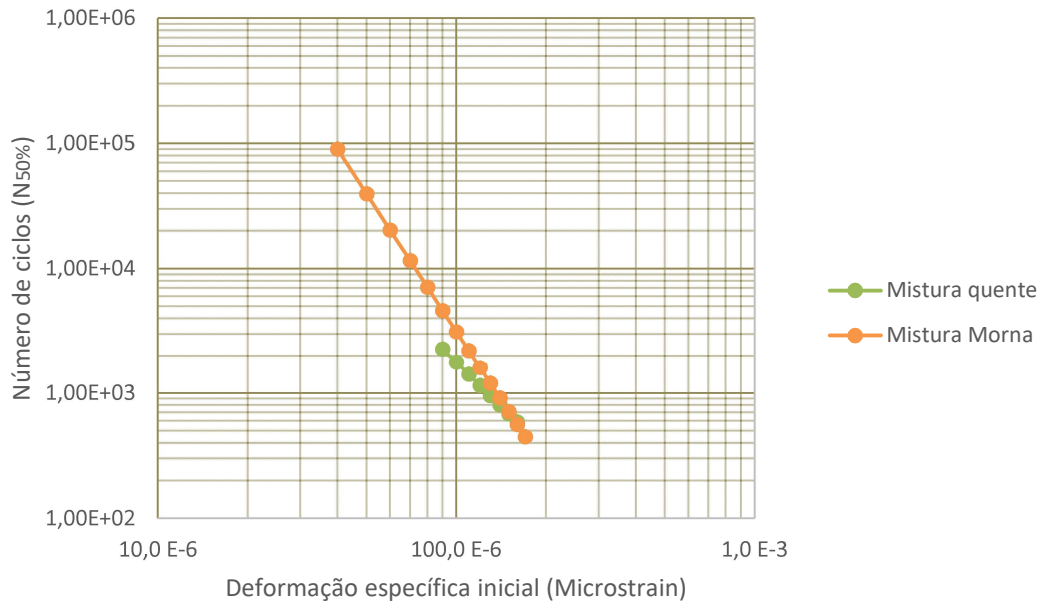
Tabela 2 – Parâmetros das curvas de fadiga do estudo

	A (intercepto)	b (inclinação)
Mistura quente	6,97E-12	3,663
Mistura morna	6,85E-07	2,353

(fonte: JOHNSTON et al., 2015)

Os Parâmetros apresentam diferenças nos valores, mas quando plotados dentro dos limites do ensaio em um gráfico com escala logarítmica, estes mostram um comportamento semelhante. O gráfico representado na figura 8 mostra as curvas de fadiga encontradas no ensaio:

Figura 8 – Curvas de fadiga das misturas



(fonte: elaborada pelo autor com base em JOHNSTON et al., 2015, p. 10)

Baseado em tais valores e curvas de fadiga como referência para o comportamento dos materiais, se dá prosseguimento na análise comparativa das misturas.

6 ANÁLISE MECANÍSTICA DAS MISTURAS ESTUDADAS

A análise dos pavimentos utilizou do método mecanístico-empírico citado anteriormente para o seu desenvolvimento. Primeiramente foi definida a estrutura das camadas a serem avaliadas, sendo a camada de revestimento de espessura variável, a base de brita graduada, uma camada de sub-base estabilizada com o objetivo de reduzir as deformações da estrutura e por último a camada de subleito.

As camadas assim definidas foram analisadas no software EVERSTRESS 5.0 para cálculo das deformações e interações entre os materiais. Este software foi desenvolvido pelo *Washington State Department of Transportation (WSDOT)* e faz parte do pacote *Everseries Pavement Analysis Programs* de análise de pavimentos. Este tipo de programa fornece como resultado a interação entre as camadas, determinando tensões, deformações e deflexões a partir do módulo de resiliência, coeficiente de Poisson e espessura das mesmas. A análise do programa é elástica e engloba a avaliação de camadas com reações sensíveis à variação de carregamentos variando o módulo de elasticidade destas. (*WASHINGTON STATE, 2005*)

O uso do EVERSTRESS 5.0 no trabalho se deve à confiabilidade nos seus resultados e ao fato de seu uso ser bastante difundido para este tipo de análise de materiais. O software considera um carregamento na superfície da 1ª camada definida, neste caso a camada asfáltica, que deve respeitar os padrões utilizados nacionalmente e que são apresentados no quadro 1:

Quadro 1 – Definição do carregamento na estrutura

Tipo de carregamento	Duplo
Raio do carregamento (cm)	10,79
Espaçamento entre os carregamentos (cm)	30
Carga aplicada (N)	20500
Pressão do carregamento (kPa)	560

(fonte: elaborado pelo autor com base em *WASHINGTON STATE, 2005*)

Cada uma das camadas foi definida a fim de tornar os resultados do trabalho o mais didático o possível. Para as camadas de base e subleito, foram utilizados dados de análises realizadas no LAPAV em uma amostra de brita graduada e em uma proveniente de uma jazida de pedra respectivamente, fornecendo assim os coeficientes para a relação entre a tensão de confinamento e o respectivo módulo de resiliência resultante dos materiais. Para a camada de sub-base foi utilizado um solo estabilizado com cimento de módulo de resiliência igual a 1000 MPa.

Para as camadas asfálticas os módulos de resiliência foram os definidos no estudo citado, sendo 4034 MPa para a mistura quente e 2404 MPa para a mistura morna, e a espessura variável entre 5 e 15 cm. Resultando assim na seguinte configuração de camadas:

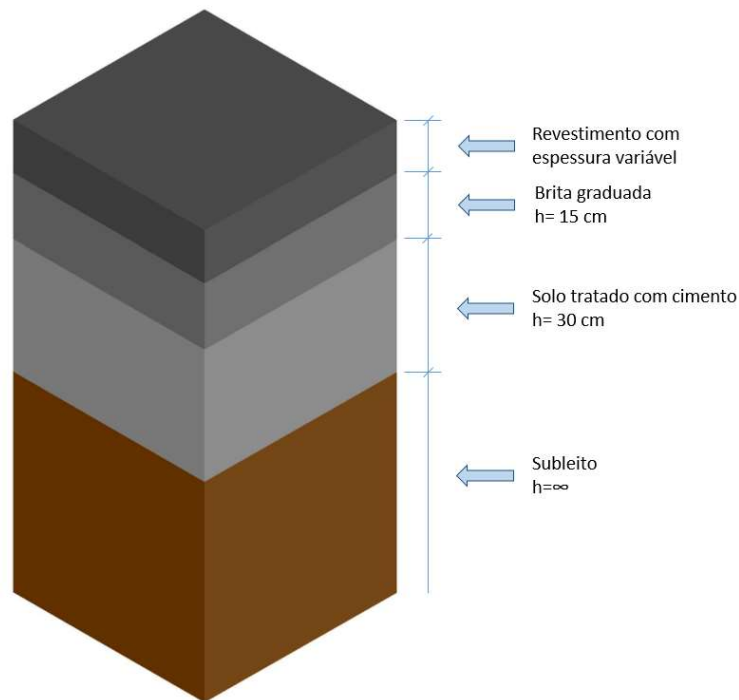
Quadro 2 – Configuração das camadas ensaiadas

Camada	Espessura (cm)	Coefficiente de Poisson	MR (MPa)
Revestimento	Variável	0,35	Variável
Base	15	0,35	Variável com o confinamento
Sub-base	30	0,30	1000
Subleito	--	0,45	Variável com o confinamento

(fonte: elaborado pelo autor)

Os relatórios gerados pelo programa para algumas das configurações estudadas estão presentes no Anexo A deste trabalho, as camadas do pavimento são apresentadas também na figura 9, ilustrando a sequência ensaiada no software:

Figura 9 – Representação das camadas do pavimento



(fonte: elaborada pelo autor)

Para cada uma das configurações, foi determinada a deformação nas fibras inferiores da camada asfáltica, sendo esta resultante do maior valor de deformação obtido na comparação entre o ponto imediatamente abaixo do carregamento e o ponto na distância média entre os carregamentos, considerado como a deformação inicial aplicada no modelo. As deformações em *micro deformações* (microstrain) para cada uma das camadas em diferentes espessuras (cm) provenientes da análise mecânica do software são apresentadas na tabela 3 e na figura 10:

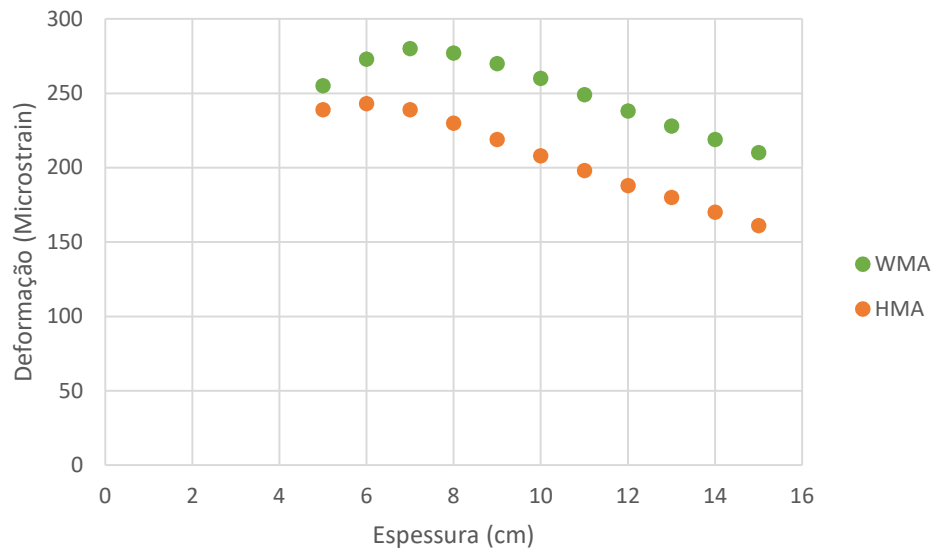
Tabela 3 – Deformações das camadas

Mistura	Espessura	Espessuras (cm)				
		5	6	7	8	9
WMA (microstrain)		255	273	280	277	270
HMA (microstrain)		239	243	239	230	219

Mistura	Espessura	Espessuras (cm)					
		10	11	12	13	14	15
WMA (microstrain)		260	249	238	228	219	210
HMA (microstrain)		208	198	188	180	170	161

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 10 – Relação entre espessuras e deformações



(fonte: elaborada pelo autor)

Utilizando as curvas de fadiga definidas no capítulo anterior, obtém-se para cada uma das espessuras o valor N_f de solicitações às quais o pavimento é capaz de suportar antes que rompa por fadiga.

Neste trabalho, entende-se que para a aplicação subsequente no capítulo 7, onde será abordado o assunto de custos relacionados a construção de uma via pavimentada, é necessário o uso de um valor estimado para o FLC das misturas. O valor definido no trabalho de Pinto (1991) ($\times 10^5$) para um determinado nível de fissuras admissíveis deveria ser reavaliado por meio de ensaios e aplicações em campo das misturas aqui apresentadas, não sendo esta, entretanto, uma das etapas do escopo do trabalho aqui apresentado. O valor utilizado é, portanto, o de 10^5 para a comparação. A tabela 4 e a figura 11 a seguir representam os valores encontrados:

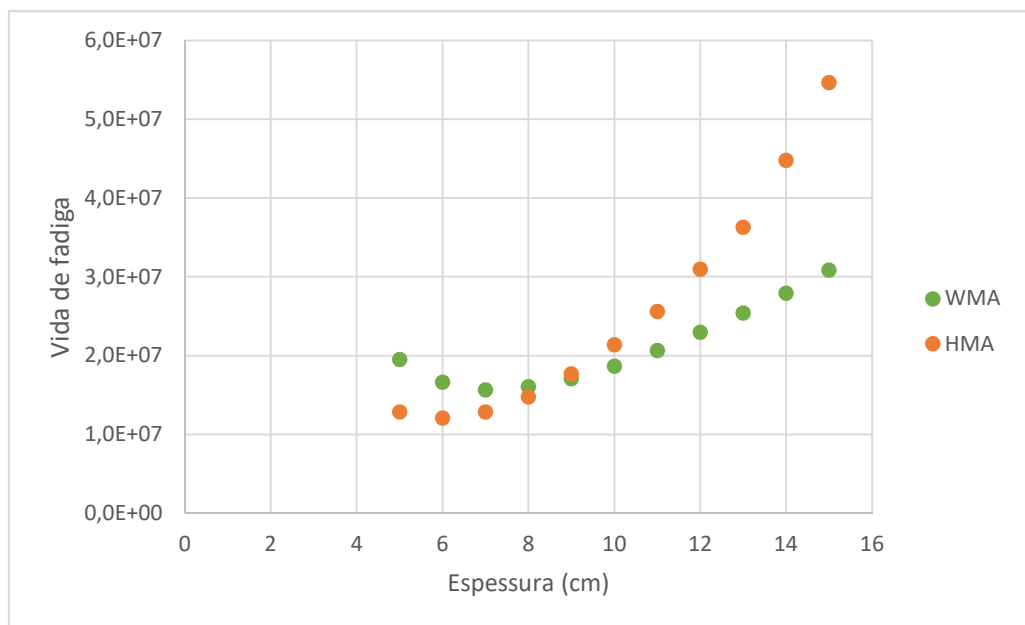
Tabela 4 – Vida de fadiga das camadas

Mistura \ Espessura	5	6	7	8	9
WMA (x10 ⁶)	19,5	16,6	15,7	16,1	17,1
HMA (x10 ⁶)	12,9	12,1	12,9	14,8	17,7

Mistura \ Espessura	10	11	12	13	14	15
WMA (x10 ⁶)	18,7	20,7	23,0	25,4	28,0	30,9
HMA (x10 ⁶)	21,4	25,6	31,0	36,3	44,8	54,7

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 11 – Relação entre espessuras e vidas de fadiga



(fonte: elaborada pelo autor)

Os resultados encontrados neste trabalho mostram que, para dimensionamentos utilizando este método mecanístico-empírico e estes modelos de fadiga, a variação do MR das misturas juntamente com as diferenças sutis nas curvas de fadiga dos materiais resultam em uma considerável alteração nas vidas de fadiga estimadas.

Para espessuras maiores estes fatores apresentam maior influência, favorecendo para a vida à fadiga aquelas misturas asfálticas que possuem maior rigidez. Para espessuras menores, as deformações tendem a aumentar até certo ponto, mas a influência do MR é reduzida.

Cabe salientar que ao se considerar espessuras mais esbeltas, tais como 5 e 6 cm, as tensões na camada de brita graduada imediatamente inferior ao pavimento aumentam, podendo assim acarretar em alguma deformação permanente com o carregamento.

Apresentam-se como soluções de camadas asfálticas para consideração e comparação no cálculo do custo no capítulo 7 as seguintes espessuras e vidas de fadiga:

Tabela 5 – Soluções consideradas no capítulo de custos de pavimentos

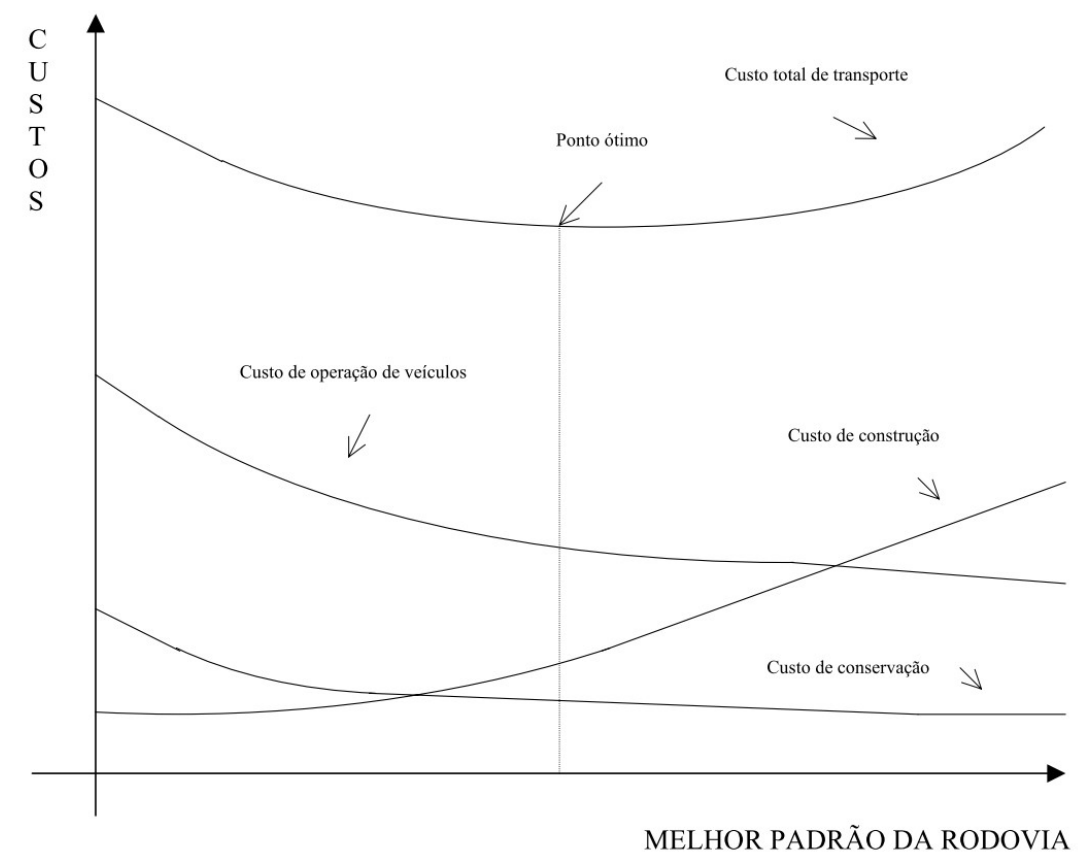
	Solução 1		Solução 2		Solução 3	
	HMA – 5 cm	WMA – 5 cm	HMA – 9 cm	WMA – 9 cm	HMA – 12 cm	WMA – 15 cm
Deformação (microstrain)	128,6	195,5	177,1	170,9	309,8	308,6
Nf (x10 ⁶)	12,9	19,5	17,7	17,1	31,0	30,9

(fonte: elaborado pelo autor)

7. ANÁLISE DE CUSTOS DOS PAVIMENTOS DIMENSIONADOS

A análise dos custos no decorrer da vida útil de uma via pavimentada exige uma visualização extensa das atividades relacionadas à obra. Se tomado como intervalo de tempo o período desde as fases iniciais, caracterizadas por estudos no local da implantação e definição do traçado, até o final de sua vida útil operacional, estipulada em projeto, identifica-se no fluxo financeiro as consequências de investimentos ou cortes feitos na etapa da construção. A figura 12 representa de forma esquemática esta alocação financeira, mostrando que menores gastos resultam na necessidade medidas corretivas mais caras e em maior custo de operação dos veículos para os usuários.

Figura 12 – Integração entre os componentes do custo total do transporte



(fonte: ARANOVICH, 1998³ apud PEDROZO, 2001)

Se apresentados de maneira resumida em grandes grupos, os custos ligados a construção podem ser identificados por diferentes atividades principais desta fase, ou seja, terraplenagem, pavimentação, drenagem, obras complementares, sinalização, OAEs, entre outros. Este trabalho objetiva abordar mais especificamente os custos ligados a pavimentação da via, uma vez que o restante das atividades não sofre influência direta das variantes consideradas.

Os custos unitários de cada um dos serviços devem ser subdivididos e considerados como o somatório de diferentes insumos ligados à sua composição. No caso da pavimentação, equipamentos, mão-de-obra, materiais e o transporte dos mesmos deve ser contabilizado separadamente. Segundo Pedrozo (2001), uma análise dos custos unitários de obras executadas no Rio Grande do Sul indica que um percentual de 74% dos custos é relacionado aos materiais, seguido pelos equipamentos (19%), transporte (4%) e mão-de-obra (3%).

A composição de um orçamento envolve a quantificação e precificação de cada um destes utilizando de custos de referência, que são custos unitários compostos de forma genérica e definidos por região. Um exemplo de fonte de dados para tal é a disponibilizada pelo DNIT chamada de SICRO (Sistema de Custos Referenciais de Obra).

Esta considera para cada atividade a ser realizada em obra uma relação de equipamentos, mão-de-obra, transporte de materiais e atividades auxiliares, bem como o custo horário ou unitário de cada um dos itens. Para os equipamentos, considera-se o uso produtivo e improdutivo, estipulando o custo operacional por hora de ambos, resultando em um custo horário de referência envolvendo também assim o tempo parado da máquina. Para os funcionários envolvidos, a composição inclui o salário e os encargos sociais a eles atrelados, resultando em uma relação para o salário-hora. Ao resultar em um custo por hora da atividade, a composição relaciona também a produção da referida equipe para o período, fator que deve se ter especial cuidado ao se comparar a utilização deste método com outros disponíveis.

Cabe ressaltar também que essa composição serve como referência, sendo necessário levar em consideração as demais peculiaridades ou variações que se pretende para a obra em específico. Fatores como quantos equipamentos e funcionários estão envolvidos no transporte e manuseio

3 ARANOVICH, A. Curso de HDM: Operação do Programa HDM Manager. Porto Alegre, v.3, 1998.

dos materiais para cada atividade, desde as jazidas ou usinas até o ponto de implantação causam mudanças nos valores. Assim como o fato de que as informações são referentes a um determinado ponto no estado ou região indicada, e uma vez que especialmente neste tipo de obra ocorrem grandes deslocamentos para execução de pavimentos em diferentes pontos, o transporte e variações locais de preço passam a ter papel de destaque na composição final do orçamento.

7.1 VARIANTES DO CUSTO RELACIONADAS AO USO DE MISTURAS MORNAS

O custo pode variar em diferentes critérios sendo a favor ou contra o uso das misturas mornas, este trabalho aborda algumas destas variações considerando valores que diferem de acordo com o fornecedor e local da obra.

7.1.1 Espessura da camada asfáltica

Para a análise do custo de execução das estruturas apresentadas no capítulo 6 foram comparadas as camadas definidas nas soluções 1, 2 e 3.

A solução 1 caracteriza-se por apresentar semelhante espessura (5 cm) para o uso dos dois materiais e estimativa de vida útil à fadiga favorável ao uso de misturas mornas. A variação da espessura na fase de execução fica assim definida como nula, variando apenas o tempo estimado para que o pavimento alcance o nível máximo de fissuras admissíveis antes do que se estipula como a ruptura por fadiga. De acordo com os dados, este tempo seria em torno de 51% maior para as misturas mornas. Entretanto, cabe ressaltar que o dimensionamento de camadas com espessuras esbeltas, tal qual a apresentada nesta solução, possui como determinante usual o estado de tensões na porção superior da camada imediatamente após a mistura asfáltica, a de brita graduada no caso, devendo ser calculado seus limites e levados em consideração na especificação.

A solução 2 apresenta semelhança tanto em relação à espessura (9 cm) quanto à vida útil. A variação do volume de material necessário fica assim definido nulo, bem como possíveis mudanças na estimativa do período necessário para alguma intervenção relacionada às fissuras por fadiga.

A solução 3 apresenta semelhança apenas quanto à vida útil. A espessura de material necessário para a execução da camada de concreto asfáltico com o aditivo é aproximadamente 3 cm a mais em uma comparação com a camada semelhante utilizando a mistura quente. Estes resultados são referentes a um pavimento com vida útil de $Nf = 30,9 \times 10^6$ com base nos modelos definidos no trabalho desenvolvido por Johnston et al. (2015) e os FLCs também definidos aqui anteriormente.

Para esta última solução, considerando uma via com faixa de tráfego com extensão de 1 km e largura de 3,6 m, a variação resulta no acréscimo de 108 m³ de concreto asfáltico. A execução da camada exige, considerando a densidade de 2,4 ton./m³ para a mistura, um adicional de 259,2 toneladas. Representando um acréscimo de 25% na espessura e materiais necessários para a execução, esta solução foi considerada de difícil aplicação do ponto de vista técnico-financeiro.

7.1.2 Aquisição dos aditivos para a mistura

A adição do Evotherm[®] na mistura envolve basicamente o custo relacionado à compra do material, uma vez que seu uso se resume à incorporação do mesmo de maneira pressurizada e estável à massa durante o processo de fabricação. É considerado neste caso o custo fornecido por Gutierrez (2016) que relaciona a adição de 0,4% do material em uma tonelada de CAP. O custo tem como referência um orçamento realizado no estado de São Paulo para o ano de 2015, sendo R\$ 105,00 a mais por tonelada de CAP mais aditivo comparado com o ligante sem este, ou R\$ 5,99 para cada tonelada de WMA se produzido a dosagem de 5,7% de teor de ligante.

7.1.3 Variação da energia para aquecimento da mistura

Prowell et al. (2012) indica que há teoricamente uma redução de 11% nos gastos com combustível para o decréscimo de 30°C das misturas. Motta (2011b) aborda o tema com foco na produção da mistura na usina, momento indicado como de maior consumo energético no processo. A pesquisadora aponta uma redução de 15% da energia necessária para secagem/vaporização d'água/aquecimento dos agregados para duas situações ao utilizar aditivos surfactantes. Prowell et al. (2012) e Motta (2011b) apontam, entretanto, que, no processo completo ao se utilizar as misturas mornas, as reduções energéticas podem chegar a valores entre 30 e 50% com uso correto de determinados aditivos, dados estes apresentados por outros estudos e fabricantes dos produtos.

O processo de aquecimento em usina dos materiais componentes da massa asfáltica é colocado segundo a composição do SICRO como sendo feito com óleo. O material fornecido por Gutierrez (2016) aponta o uso de óleo 4,0 kg/ton. para aquecimento do agregado para a temperatura necessária sem o Evotherm[®] e 2,25 kg/ton. para aquecimento do de agregado para a temperatura necessária com o uso do aditivo na mesma proporção citada anteriormente, lembrando que a temperatura de utilização do ligante não varia entre os casos. Esta relação de consumo representa a economia de 43% de combustível e será utilizada na composição.

7.1.4 Produtividade das atividades

D'Angelo et al. (2008) e Prowell et al. (2012) afirmam que se utilizadas de maneira correta, as mudanças decorrentes adição dos aditivos aumentam a produtividade tanto na usina como em campo. Esta mudança na produtividade se relaciona principalmente com a melhora nas condições de trabalho e trabalhabilidade do material em campo. D'Angelo et al. (2008) cita que há maior retenção dos operários para as atividades, criando assim um corpo de funcionários mais experientes o que melhora a qualidade do serviço. Prowell et al. (2012) salienta que a produtividade da usina não é alterada de maneira expressiva, os processos de mistura e secagem dos materiais tendem a se manter constantes.

O material fornecido por Gutierrez (2016) indica também a variação da produtividade em campo quando aplicada a solução com o aditivo Evotherm[®], ele indica que há um aumento de 30% na produtividade da equipe de trabalho. Esta variação implica em mudanças no tempo necessário de uso dos equipamentos e da permanência da equipe de trabalho em campo. Mudando assim os quantitativos de custo apresentados como padronizados em tabelas como o SICRO.

7.2 COMPOSIÇÕES DE CUSTO GERADAS

A partir das planilhas de custos unitários de referência, disponibilizadas pelo DNIT em seu Sistema de Custos Rodoviários (SICRO) e das variações apresentadas, podemos identificar alguns dos pontos para os quais o custo de duas capas de rolamento vão variar. Cabe ressaltar que este exercício apresenta simplificações e considerações importantes tais como:

- a) o custo do transporte será considerado tal qual Pedrozo (2011) apontou para seu estudo feito no Rio Grande do Sul, 4% do valor final encontrado;
- b) desconsideração de impostos não contabilizados na planilha de custos não desonerados;
- c) o custo relacionado ao CAP não é definido nas planilhas de custos unitários padronizadas, apesar de representar um percentual expressivo do custo total da mistura. Neste trabalho serão adicionados os valores fornecidos por Gutierrez (2016) sendo R\$ 1.510,00 para a situação sem o aditivo e R\$ 1.615,00 com este;
- d) consideração de apenas dois serviços como variantes no processo de uso das misturas mornas. Sendo estes Usinagem de CBUQ (capa de rolamento) (código SICRO2: 1 A 01 390 02) e Conc. betuminoso usinado a quente - capa rolamento (código SICRO2: 2 S 02 540 01);
- e) simplificação da consideração do aumento da produtividade ao aplicá-lo diretamente sobre a produção horária da equipe e equipamentos do serviço de execução da capa de rolamento.

Levando em conta estas considerações, foi elaborada uma planilha de custo unitário para a produção de uma tonelada de concreto betuminoso usinado a quente com mistura quente e com mistura morna, denominado também como a capa de rolamento. Fazendo uso da planilha de custos não desonerada do estado de São Paulo, a fim de condizer com a relação de valores custos apresentados. Para fins de organização do trabalho os resultados são apresentados no anexo B.

A composição gerou como custo unitário total dos serviços apresentado na tabela 6:

Tabela 6 – Custos unitários totais dos serviços analisados

	CBUQ	CBUQ com aditivo Evotherm® +0,4%
Usinagem de CBUQ (capa de rolamento)	125,69	127,60
Conc. betuminoso usinado a quente - capa rolamento	178,13	177,82

(fonte: elaborada pelo autor)

Os resultados mostram que apesar dos custos relacionados com a aquisição do material Evotherm®, o aumento da produtividade em campo e a redução nos gastos com combustíveis possibilita que o custo para aplicação de uma tonelada da mistura em campo apresente um preço competitivo e até mesmo menor que o relacionado a aplicação da mistura quente.

Salienta-se a importância de que para tal consideração de que a aplicação da mistura é viável economicamente, a quantidade de material necessário para as soluções a quente e morna deve ser igual ou semelhante. Situação que, se consideradas as soluções apresentadas no capítulo 6, se configuram para espessuras próximas ou inferiores a 9 cm.

Em comparação aos estudos apresentados no capítulo 3 de revisão bibliográfica, que tratam do comparativo de custos, os resultados se mostraram semelhantes a estes. Considerando que na aplicação do Evotherm[®] não há necessidade de alterações nas plantas das usinas de concreto asfáltico, a pequena variação de preço entre os métodos construtivos para estruturas de mesma espessura está de acordo com o esperado.

7.3 DE MAIS CONSIDERAÇÕES NO CUSTO

Em uma análise financeira mais detalhada da implementação das soluções utilizando as misturas mornas, exige-se que uma compensação dos efeitos ambientais do uso da tecnologia seja também considerado. Atualmente não é uma prática corriqueira em estudos de implantação deste tipo de projeto no Brasil, mas em países como França já se considera como um fator no orçamento a compensação da emissão de gases de efeito estufa e os investimentos ligados às medidas mitigadoras.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho verificou em seu desenvolvimento que atualmente existem no mercado uma série de produtos que permitem a redução das temperaturas necessárias para usinagem e aplicação de misturas quentes. Como qualquer outro tipo de solução que visa trazer inovação ao mercado de pavimentação, é necessário que sejam testadas as propriedades físicas da mistura com o produto a fim de averiguar se o seu uso não prejudica, a longo prazo, a condição geral das vias que o utilizarem.

Trazer uma abordagem baseada em modelos de previsão da vida útil que permitissem avaliar as consequências decorrentes do uso destes materiais fez parte do escopo deste trabalho. Os resultados indicaram que, com as condicionantes colocadas, revestimentos asfálticos classificados como de misturas mornas de maior espessura terminam por apresentar menor vida útil quando inseridas as solicitações usuais do tráfego. Soluções de menor espessura, por outro lado, apresentaram desempenho satisfatório e até mesmo melhor em comparação às projetadas com misturas quentes. Entretanto, camadas muito delgadas tendem a transmitir esforços muito elevados aos materiais subjacentes do resto da estrutura, comprometendo estes com deformações permanentes se não projetados para tais carregamentos.

O objetivo do trabalho, no entanto, era avaliar a viabilidade econômica de execução no Brasil de tais misturas. O comparativo de custos por meio das composições de preço mostrou que sim, os custos de aplicação das duas soluções são semelhantes, sendo ainda vantajoso o uso de misturas mornas se avaliado de maneira a abranger os custos sociais e ambientais nos cálculos.

REFERÊNCIAS

- BABURAMANI, P. **Asphalt fatigue life prediction models**: a literature review. Vermont South, Victoria: ARRB Transport Research, 1999. Research Report ARR n. 334
- BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 3ª ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.
- D'ANGELO, J.; HARM, E.; BARTOSZEK, J.; BAUMGARDNER, G.; CORRIGAN, M.; COWSERT, J.; HARMAN, J.; JAMSHIDI, M.; JONES, W.; NEWCOMB, D.; PROWELL, B.; SINES, R.; YEATON, B. **Warm-Mix Asphalt**: European Practice. Alexandria, 2008. Boletim Técnico n. FHWA-PL-08-007.
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 005 – TER**: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos Terminologia. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **IPR-719**: Manual de pavimentação. Rio de Janeiro, 2006.
- GRECA, M. R.; RIGOTTO, M. 3ª geração ECOFLEXPAVE. **Fatos e Asfaltos**, Araucária, PR, nº 22, p. 4, dez. 2011. Disponível em http://www.grecaasfaltos.com.br/fatos/fatos_22.pdf. Acesso em: 22 nov. 2015.
- GUTIERREZ, L. M. Publicação eletrônica [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <Leonardo.endres.rs@gmail.com> em 14 set. 2016.
- HANSEN, K.R.; NEWCOMB, D.E. **Asphalt Pavement Mix Production Survey**: reclaimed asphalt pavement, reclaimed asphalt shingles, warm-mix asphalt usage: 2009-2010. Lanham, MD, 2011, Technical Report n. 138.
- 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 Ensaios de Tração Indireta por Compressão Diametral. In: CONGRESO IBERO LATINOAMERICANO DEL ALFALTO, n. 18, 2015, Patagonia, Argentina. Não paginado.
- KRISTJANSDOTTIR, O. **Warm mix asphalt for cold weather paving**. 2006. 127 f. Final Report (Master of Science in Civil Engineering) – University of Washington, Seattle, WA, 2006.
- MERIGHI, C.; MAGALHÃES, A.; CÂNDIDO, N.; MELO, D.; ROSA, P.; SUZUKI, C.; Experiência da concessionária Ecovias na utilização da tecnologia do asfalto morno com adição de borracha. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 41., 2012, Fortaleza, CE. **Anais...** Disponível em: https://www.academia.edu/7785033/EXPERI%C3%8ANCIA_DA_CONCESSION%C3%81RIA_ECOVIAS_NA_UTILIZA%C3%87%C3%83O_DA_TECNOLOGIA_DO_ASFALTO_MORNO_COM_ADI%C3%87%C3%83O_DE_BORRACHA. Acesso em: 22 nov. 2015.

MOTTA, R dos S.; BERNUCCI, L.; FARIA, V. C.; SOUZA, D. R.; LEAL, J. F. **Estudo de mistura asfáltica morna como revestimento de pavimento**: aplicação na rodovia presidente Dutra. São Paulo, 2011a. Boletim técnico.

MOTTA, R dos S. **Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e consumo energético**. 2011. 229 p. Tese (Doutorado), Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011b.

NEW YORK STATE, Department of Transportation, New York, 2013. **Evotherm**: Mix Asphalt Technology. Technical Services Repository. Disponível em: <<https://www.dot.ny.gov/divisions/engineering/technical-services/technical-services-repository/details/evotherm.pdf>>. Acesso em: 03 set. 2016.

NCHRP – National Cooperative Highway Research Program. **Mix design practices for warm mix asphalt**. Report 691. Washington D. C.: Transportation Research Board, 2011.

PEDROZO, L. G. **Custos da infra-estrutura rodoviária**: análise e sistematização. 2001. 183 f. Trabalho de conclusão (Mestrado Profissionalizante em Engenharia) – Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. 1991. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Portland Bureau of Transportation. Portland, Oregon, USA, 2013. City of Portland Green Purchasing Case Study. Disponível em: <<http://www.portlandoregon.gov/brfs/article/368274>>. Acesso em: 22 nov. 2015.

Portland Cement Association. Skokie, IL, 2014. Paving Cost Comparisons. Disponível em: <http://www.cement.org/docs/default-source/market-economics-pdfs/issues-trends/paving_cost_comparisons_flash.pdf?sfvrsn=4>. Acesso em: 22 nov. 2015.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C.; FRANK, B. **Warm-Mix Asphalt**: best practices. 3rd ed. Lanham, Maryland: NAPA – National Asphalt Pavement Association, 2012.

RIVOIRE JUNIOR, L. **Avaliação de misturas mornas com emprego de simulador de tráfego linear**. 2014. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

WASHINGTON STATE, Department of Transportation. **Everseries User's Guide**: Pavement Analysis Computer Software and Case Studies. 2005. Disponível em: <<http://www.wsdot.wa.gov/Business/MaterialsLab/PavementGuide.htm>> Acesso em: 11 de out. 2016

WAKEFIELD, A. **A comprehensive evaluation of hot mix asphalt versus chemically modified warm mix asphalt**. 2011. 108 f. Final Report (Master of Science in Civil Engineering) – University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2011.

ANEXO A – Relatórios de análises do EVERSTRESS 5.0

Layered Elastic Analysis by Everstress® 5.0

Title: HMA CILA 6 CM

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.35	6.000	4034.00			
2	.35	15.000	180.00	243.91	96.76	.794
3	.30	30.000	1000.00			
4	.45		60.00	60.09	94.82	.252

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.790
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.790

No of Iteration: 6

Maximum Error in Modulus: .0

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-1666.71	-1884.24	-560.00	.00	.00	.00
5.990	1	1019.49	1231.53	-303.67	.00	9.59	.00
51.010	4	-3.80	-2.76	-17.35	.00	2.32	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		E _{xx} (10 ⁻⁶)	E _{yy} (10 ⁻⁶)	E _{zz} (10 ⁻⁶)	U _x (microns)	U _y (microns)	U _z (microns)
.000	1	-201.10	-273.89	169.27	9.858	.000	435.536
5.990	1	172.22	243.18	-270.58	-3.687	.000	432.271
51.010	4	87.27	112.55	-239.60	-14.398	.000	297.653

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-1884.24	-1666.71	-560.00	-273.89	-201.10	169.27
5.990	1	-303.74	1019.56	1231.53	-270.61	172.24	243.18
51.010	4	-17.74	-3.42	-2.76	-248.95	96.62	112.55

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	39.22	-999.38	.00	.00	.00	.00
5.990	1	-491.50	630.74	-203.97	.00	.00	.00
51.010	4	-3.60	-2.83	-18.59	.00	.00	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		E _{xx} (10 ⁻⁶)	E _{yy} (10 ⁻⁶)	E _{zz} (10 ⁻⁶)	U _x (microns)	U _y (microns)	U _z (microns)
.000	1	96.43	-251.14	83.31	.000	.000	416.534
5.990	1	-158.87	216.70	-62.64	.000	.000	417.418
51.010	4	100.40	119.08	-261.12	.000	.000	304.829

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-999.38	.00	39.22	-251.14	83.31	96.43
5.990	1	-491.50	-203.97	630.74	-158.87	-62.64	216.70
51.010	4	-18.59	-3.60	-2.83	-261.12	100.40	119.08

Layered Elastic Analysis by Everstress® 5.0

Title: HMA CILA 9 CM

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.35	9.000	4034.00			
2	.35	15.000	180.00	189.41	96.76	.794
3	.30	30.000	1000.00			
4	.45		60.00	58.80	94.82	.252

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.790
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.790

No of Iteration: 4

Maximum Error in Modulus: .1

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-1333.41	-1564.68	-560.00	.00	.00	.00
8.990	1	887.85	1128.99	-190.91	.00	11.89	.00
54.010	4	-3.66	-2.87	-15.95	.00	2.00	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		E _{xx} (10 ⁻⁶)	E _{yy} (10 ⁻⁶)	E _{zz} (10 ⁻⁶)	U _x (microns)	U _y (microns)	U _z (microns)
.000	1	-146.20	-223.60	112.63	12.348	.000	409.391
8.990	1	138.70	219.40	-222.31	-8.759	.000	404.027
54.010	4	81.74	101.33	-221.31	-13.386	.000	291.758

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-1564.68	-1333.41	-560.00	-223.60	-146.20	112.63
8.990	1	-191.04	887.99	1128.99	-222.35	138.75	219.40
54.010	4	-16.27	-3.34	-2.87	-229.15	89.58	101.33

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-355.37	-1027.20	.00	.00	.00	.00
8.990	1	90.79	835.94	-168.45	.00	.00	.00
54.010	4	-3.51	-2.97	-16.99	.00	.00	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		E _{xx} (10 ⁻⁶)	E _{yy} (10 ⁻⁶)	E _{zz} (10 ⁻⁶)	U _x (microns)	U _y (microns)	U _z (microns)
.000	1	1.03	-223.80	119.95	.000	.000	408.218
8.990	1	-35.41	213.96	-122.16	.000	.000	408.691
54.010	4	93.08	106.39	-239.36	.000	.000	298.241

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-1027.20	-355.37	.00	-223.80	1.03	119.95
8.990	1	-168.45	90.79	835.94	-122.16	-35.41	213.96
54.010	4	-16.99	-3.51	-2.97	-239.36	93.08	106.39

Layered Elastic Analysis by Everstress® 5.0

Title: HMA CILA 12 CM

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.35	12.000	4034.00			
2	.35	15.000	150.00	151.14	96.76	.794
3	.30	30.000	1000.00			
4	.45		60.00	57.32	94.82	.252

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.790
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.790

No of Iteration: 4

Maximum Error in Modulus: .1

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-1136.83	-1329.61	-560.00	.00	.00	.00
11.990	1	764.68	974.54	-129.45	.00	10.32	.00
57.010	4	-3.59	-3.02	-14.46	.00	1.64	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		E _{xx} (10 ⁻⁶)	E _{yy} (10 ⁻⁶)	E _{zz} (10 ⁻⁶)	U _x (microns)	U _y (microns)	U _z (microns)
.000	1	-117.87	-182.38	75.17	13.013	.000	390.478
11.990	1	116.24	186.47	-182.99	-10.902	.000	383.014
57.010	4	74.50	89.06	-200.31	-12.065	.000	286.918

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-1329.61	-1136.83	-560.00	-182.38	-117.87	75.17
11.990	1	-129.57	764.80	974.54	-183.03	116.28	186.47
57.010	4	-14.70	-3.35	-3.02	-206.46	80.65	89.06

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-462.07	-922.80	.00	.00	.00	.00
11.990	1	340.88	835.53	-126.02	.00	.00	.00
57.010	4	-3.49	-3.12	-15.27	.00	.00	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		E _{xx} (10 ⁻⁶)	E _{yy} (10 ⁻⁶)	E _{zz} (10 ⁻⁶)	U _x (microns)	U _y (microns)	U _z (microns)
.000	1	-34.48	-188.66	120.15	.000	.000	392.326
11.990	1	22.94	188.48	-133.31	.000	.000	392.321
57.010	4	83.47	92.80	-214.45	.000	.000	292.567

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-922.80	-462.07	.00	-188.66	-34.48	120.15
11.990	1	-126.02	340.88	835.53	-133.31	22.94	188.48
57.010	4	-15.27	-3.49	-3.12	-214.45	83.47	92.80

Layered Elastic Analysis by Everstress® 5.0

Title: WMA CILA 5 CM

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.35	5.000	2404.00			
2	.35	15.000	180.00	286.22	96.76	.794
3	.30	30.000	1000.00			
4	.45		60.00	60.71	94.82	.252

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.790
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.790

No of Iteration: 6

Maximum Error in Modulus: .3

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-1361.35	-1464.18	-560.00	.00	.00	.00
4.990	1	581.45	670.52	-417.24	.00	5.32	.00
50.010	4	-4.25	-3.09	-18.41	.00	2.45	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	-271.58	-329.33	178.43	9.887	.000	465.061
4.990	1	204.99	255.01	-355.83	.956	.000	460.246
50.010	4	89.40	117.12	-248.94	-14.737	.000	308.742

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-1464.18	-1361.35	-560.00	-329.33	-271.58	178.43
4.990	1	-417.27	581.48	670.52	-355.85	205.01	255.01
50.010	4	-18.82	-3.84	-3.09	-258.74	99.21	117.12

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	294.17	-567.54	.00	.00	.00	.00
4.990	1	-731.74	166.00	-185.87	.00	.00	.00
50.010	4	-4.06	-3.15	-19.71	.00	.00	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	204.99	-278.91	39.80	.000	.000	415.304
4.990	1	-301.49	202.64	5.05	.000	.000	416.808
50.010	4	102.65	124.26	-271.25	.000	.000	316.228

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-567.54	.00	294.17	-278.91	39.80	204.99
4.990	1	-731.74	-185.87	166.00	-301.49	5.05	202.64
50.010	4	-19.71	-4.06	-3.15	-271.25	102.65	124.26

Layered Elastic Analysis by Everstress® 5.0

Title: WMA CILA 6 CM

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.35	6.000	2404.00			
2	.35	15.000	180.00	262.42	96.76	.794
3	.30	30.000	1000.00			
4	.45		60.00	60.39	94.82	.252

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.790
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.790

No of Iteration: 6

Maximum Error in Modulus: .1

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-1304.69	-1432.88	-560.00	.00	.00	.00
5.990	1	633.30	754.35	-358.47	.00	7.61	.00
51.010	4	-4.12	-3.02	-17.95	.00	2.38	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		E _{xx} (10 ⁻⁶)	E _{yy} (10 ⁻⁶)	E _{zz} (10 ⁻⁶)	U _x (microns)	U _y (microns)	U _z (microns)
.000	1	-252.57	-324.56	165.62	10.690	.000	455.159
5.990	1	205.80	273.78	-351.14	-1.539	.000	449.101
51.010	4	88.06	114.40	-243.99	-14.524	.000	305.218

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-1432.88	-1304.69	-560.00	-324.56	-252.57	165.62
5.990	1	-358.53	633.36	754.35	-351.18	205.83	273.78
51.010	4	-18.34	-3.72	-3.02	-253.52	97.59	114.40

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	150.31	-636.96	.00	.00	.00	.00
5.990	1	-550.52	293.98	-198.80	.00	.00	.00
51.010	4	-3.92	-3.09	-19.21	.00	.00	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		E _{xx} (10 ⁻⁶)	E _{yy} (10 ⁻⁶)	E _{zz} (10 ⁻⁶)	U _x (microns)	U _y (microns)	U _z (microns)
.000	1	155.26	-286.84	70.85	.000	.000	419.037
5.990	1	-242.86	231.38	-45.35	.000	.000	420.342
51.010	4	101.23	121.19	-265.85	.000	.000	312.551

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-636.96	.00	150.31	-286.84	70.85	155.26
5.990	1	-550.52	-198.80	293.98	-242.86	-45.35	231.38
51.010	4	-19.21	-3.92	-3.09	-265.85	101.23	121.19

Layered Elastic Analysis by Everstress® 5.0

Title: WMA CILA 9 CM

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.35	9.000	2404.00			
2	.35	15.000	180.00	208.12	96.76	.794
3	.30	30.000	1000.00			
4	.45		60.00	59.32	94.82	.252

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.790
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.790

No of Iteration: 5

Maximum Error in Modulus: .1

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-1092.60	-1252.29	-560.00	.00	.00	.00
8.990	1	615.12	781.55	-235.93	.00	12.04	.00
54.010	4	-3.86	-2.98	-16.61	.00	2.12	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		E _{xx} (10 ⁻⁶)	E _{yy} (10 ⁻⁶)	E _{zz} (10 ⁻⁶)	U _x (microns)	U _y (microns)	U _z (microns)
.000	1	-190.64	-280.32	108.45	13.438	.000	430.542
8.990	1	176.44	269.90	-301.48	-7.754	.000	420.906
54.010	4	83.50	105.15	-228.18	-13.722	.000	297.402

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-1252.29	-1092.60	-560.00	-280.32	-190.64	108.45
8.990	1	-236.10	615.29	781.55	-301.58	176.53	269.90
54.010	4	-16.96	-3.52	-2.98	-236.59	91.90	105.15

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-147.10	-708.92	.00	.00	.00	.00
8.990	1	-109.69	507.82	-186.26	.00	.00	.00
54.010	4	-3.69	-3.07	-17.72	.00	.00	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		E _{xx} (10 ⁻⁶)	E _{yy} (10 ⁻⁶)	E _{zz} (10 ⁻⁶)	U _x (microns)	U _y (microns)	U _z (microns)
.000	1	42.02	-273.48	124.63	.000	.000	417.549
8.990	1	-92.44	254.33	-135.44	.000	.000	418.073
54.010	4	95.55	110.75	-247.56	.000	.000	304.167

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-708.92	-147.10	.00	-273.48	42.02	124.63
8.990	1	-186.26	-109.68	507.82	-135.44	-92.44	254.33
54.010	4	-17.72	-3.69	-3.07	-247.56	95.55	110.75

Layered Elastic Analysis by Everstress® 5.0

Title: HMA CILA 5 CM

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.35	5.000	4034.00			
2	.35	15.000	180.00	268.38	96.76	.794
3	.30	30.000	1000.00			
4	.45		60.00	60.44	94.82	.252

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.790
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.790

No of Iteration: 6

Maximum Error in Modulus: .1

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-1795.26	-1979.52	-560.00	.00	.00	.00
4.990	1	1026.93	1197.54	-363.42	.00	7.35	.00
50.010	4	-3.89	-2.76	-17.79	.00	2.40	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	-224.70	-286.36	188.69	8.784	.000	446.919
4.990	1	182.20	239.29	-283.09	-1.279	.000	444.370
50.010	4	88.66	115.68	-244.77	-14.631	.000	300.437

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-1979.52	-1795.26	-560.00	-286.36	-224.70	188.69
4.990	1	-363.46	1026.97	1197.54	-283.10	182.21	239.29
50.010	4	-18.19	-3.49	-2.76	-254.47	98.35	115.68

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	273.38	-914.48	.00	.00	.00	.00
4.990	1	-787.41	464.29	-202.32	.00	.00	.00
50.010	4	-3.69	-2.83	-19.07	.00	.00	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	147.11	-250.41	55.62	.000	.000	414.617
4.990	1	-217.92	200.97	-22.12	.000	.000	415.629
50.010	4	102.00	122.64	-266.98	.000	.000	307.777

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-914.48	.00	273.38	-250.41	55.62	147.11
4.990	1	-787.41	-202.32	464.29	-217.92	-22.12	200.97
50.010	4	-19.07	-3.69	-2.83	-266.98	102.00	122.64

Layered Elastic Analysis by Everstress© 5.0

Title: WMA CILA 15 CM

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.35	15.000	2404.00			
2	.35	15.000	115.00	142.00	96.76	.794
3	.30	30.000	1000.00			
4	.45		60.00	56.79	94.82	.252

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.790
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.790

No of Iteration: 5

Maximum Error in Modulus: .4

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-861.77	-984.35	-560.00	.00	.00	.00
14.990	1	479.70	620.34	-120.54	.00	10.47	.00
60.010	4	-3.59	-3.07	-13.93	.00	1.53	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	-133.63	-202.47	35.83	14.939	.000	397.269
14.990	1	126.78	205.76	-210.30	-12.758	.000	380.874
60.010	4	71.45	84.76	-192.48	-11.539	.000	285.970

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-984.35	-861.77	-560.00	-202.47	-133.63	35.83
14.990	1	-120.73	479.89	620.34	-210.40	126.88	205.76
60.010	4	-14.15	-3.37	-3.07	-198.14	77.11	84.76

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-284.20	-602.49	.00	.00	.00	.00
14.990	1	246.21	550.57	-118.47	.00	.00	.00
60.010	4	-3.50	-3.17	-14.67	.00	.00	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	-30.50	-209.25	129.09	.000	.000	391.761
14.990	1	39.51	210.42	-165.29	.000	.000	390.337
60.010	4	79.73	88.18	-205.51	.000	.000	291.330

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-602.49	-284.20	.00	-209.25	-30.50	129.09
14.990	1	-118.47	246.22	550.57	-165.29	39.51	210.42
60.010	4	-14.67	-3.50	-3.17	-205.51	79.73	88.18

ANEXO B – Composição dos custos unitários totais

BASEADO EM

1 A 01 390 02 - Usinagem de CBUQ (capa de rolamento)

A - Equipamento

Código		Quantidade	Utilização		Custo Operacional		Custo Horário (R\$)
			Operativa	Improdutiva	Operativo	Improdutivo	
E010	Carregadeira de Pneus - 3,3 m3 (147 kW)	1	0,26	0,74	212,88	24,24	73,29
E110	TanquedeEstocagemdeAsfalto-30000l	2	1	0	17,75	0	35,50
E112	Aquecedor de FluidoTérmico - (12 kW)	1	1	0	96,7	0	96,70
E147	Usinade Asfalto a Quente - 90/120t/h com filtro de manga (188 kW)	1	1	0	201,26	21,26	201,26
E501	Grupo Gerador - 36/40 KVA (32 kW)	1	1	0	20,33	0	20,33
E503	Grupo Gerador - 164/180 KVA (144 kW)	1	1	0	83,99	0	83,99

B - Mão-de-Obra

	Quantidade	Salário-Hora	Custo Horário (R\$)
T501 Encarregado de Obra	1	30,88	30,88
T701 Servente	8	12,43	99,44
			130,32
		Adc M.O. = Ferramentas 15,51%	20,21
		Custo horário de execução	661,60

C - Material

	Quantidade	Unidade	densidade	Preço Unitário	Custo Unitário (R\$)
M003 Óleo combustível 1A	4,38	l	0,913	2,13	9,33
M101 Cimento asfáltico CAP 50/70	0,057	t		1510	86,07
M905 Filler	28	kg		0,15	4,2

D - Atividades Auxiliares

	Quantidade	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário (R\$)
1 A 01 170 01 Areia extraída com escavadeira hidráulica	0,0533	m3	6,9	0,37
1 A 01 200 01 Brita produzida em central de britagem de 80 m3/h	0,558	m3	30,29	16,90
				17,27

Custo Unitário Direto Total	125,69
-----------------------------	--------

Preço Unitário Total	125,69
----------------------	--------

BASEADO EM: 1 A 01 390 02 - Usinagem de CBUQ (capa de rolamento)

Usinagem de CBUQ - com aditivo Evotherm® +0,4% (capa de rolamento)

		Utilização		Produção (t)		Custo Horário (R\$)		
A - Equipamento		Quantidade		Custo Operacional				
Código			Operativa	Improdutiva	Operativo	Improdutivo		
E010	Carregadeira de Pneus - 3,3 m3 (147 kW)	1	0,26	0,74	212,88	24,24	73,29	
E110	TanquedeEstocagemdeAsfalto-30000l	2	1	0	17,75	0	35,50	
E112	Aquecedor de FluidoTérmico - (12 kW)	1	1	0	96,7	0	96,70	
E147	Usinade Asfalto a Quente - 90/120t/h com filtro de manga (188 kW)	1	1	0	201,26	21,26	201,26	
E501	Grupo Gerador - 36/40 KVA (32 kW)	1	1	0	20,33	0	20,33	
E503	Grupo Gerador - 164/180 KVA (144 kW)	1	1	0	83,99	0	83,99	
							511,07	
B - Mão-de-Obra		Quantidade			Salário-Hora	Custo Horário (R\$)		
T501	Encarregado de Obra	1			30,88	30,88		
T701	Servente	8			12,43	99,44		
							130,32	
					Adc M.O. = Ferramentas	15,51%	20,21	
							Custo horário de execução	661,60
							Custo unitário de execução	8,82
C - Material		Quantidade	Unidade	densidade	Preço Unitário	Custo Unitário (R\$)		
M003	Óleo combustível 1A (xisto)	2,46	l	0,913	2,13	5,25		
M101	Cimento asfáltico CAP 50/70	0,057	t		1510	86,07		
M905	Filler	28	kg		0,15	4,2		
--	Evotherm®	0,228	kg		26,28	5,99		
							101,51	
D - Atividades Auxiliares		Quantidade	Unidade			Preço Unitário	Custo Unitário (R\$)	
1 A 01 170 01	Areia extraída com escavadeira hidráulica	0,0533	m3			6,9	0,37	
1 A 01 200 01	Brita produzida em central de britagem de 80 m3/h	0,558	m3			30,29	16,90	
							17,27	
							Custo Unitário Direto Total	127,60
							Preço Unitário Total	127,60

BASEADO EM

2 S 02 540 01 - Conc. betuminoso usinado a quente - capa rolamento

A - Equipamento

Código		Quantidade	Utilização		Produção (t) 75		Custo Horário (R\$)
			Operativa	Improdutiva	Operativo	Improdutivo	
E007	Trator Agrícola - (74 kW)	1	0,24	0,76	69,4	16,34	29,07
E102	Rolo Compactador - Tanden Vibrat. Autoprop. 10,2 t (82 kW)	1	0,56	0,44	110,74	16,34	69,20
E105	Rolo Compactador - de pneus autoprop. 25 t (98 kW)	2	0,29	0,71	128,37	16,34	97,66
E107	Vassoura Mecânica - Rebocável	1	0,24	0,76	4,41	0	1,06
E149	Vibro-acabadora de asfalto - sobre esteiras (82 kW)	1	0,81	0,19	147,62	21,26	123,61
E404	Caminhão basculante - 10 m3 - 15 t (210 kW)	1,53	1	0	135,08	18,06	206,67

B - Mão-de-Obra

	Quantidade	Salário-Hora	Custo Horário (R\$)
T511 Encarregado de Pavimentação	1	46,37	46,37
T701 Servente	8	12,43	99,44
		Adc M.O. = Ferramentas 15,51%	22,62
		Custo horário de execução	695,70

C - Atividades Auxiliares

	Quantidade	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário (R\$)
1 A 01 390 02 - Usinagem de CBUQ (capa de rolamento)	1	t	125,69	125,69
				125,69

D - Transporte de Materiais

Cimento Asfáltico CAP 50/70	0,057
Filler	0,028

E - Transporte de Materiais Produzidos / Comerciais

Areia extraída com escavadeira hidráulica	0,08
Brita produzida em central de britagem de 80 m3/h	0,0837
Usinagem de CBUQ (Capa de rolamento)	1

Soma dos custos de transporte 5,62

Custo Unitário Direto Total (R\$) 140,59

Lucro e Despesas Indiretas (26,70%) 37,54

Preço Unitário Total (R\$) 178,13

BASEADO EM: 2 S 02 540 01 - Conc. betuminoso usinado a quente - capa rolamento

Conc. betuminoso usinado a quente - capa rolamento - com aditivo Evotherm® +0,4%

A - Equipamento		Quantidade	Utilização		Produção (t)		97,5	30% +	Custo Horário (R\$)
			Operativa	Improdutiva	Operativo	Improdutivo			
Código									
E007	Trator Agrícola - (74 kW)	1	0,24	0,76	69,4	16,34			29,07
E102	Rolo Compactador - Tandem Vibrat. Autoprop. 10,2 t (82 kW)	1	0,56	0,44	110,74	16,34			69,20
E105	Rolo Compactador - de pneus autoprop. 25 t (98 kW)	2	0,29	0,71	128,37	16,34			97,66
E107	Vassoura Mecânica - Rebocável	1	0,24	0,76	4,41	0			1,06
E149	Vibro-acabadora de asfalto - sobre esteiras (82 kW)	1	0,81	0,19	147,62	21,26			123,61
E404	Caminhão basculante - 10 m3 - 15 t (210 kW)	1,53	1	0	135,08	18,06			206,67
									527,3
B - Mão-de-Obra		Quantidade			Salário-Hora			Custo Horário (R\$)	
T511	Encarregado de Pavimentação	1			46,37			46,37	
T701	Servente	8			12,43			99,44	
									145,81
					Adc M.O. = Ferramentas	15,51%			22,62
									Custo horário de execução
									695,70
									Custo unitário de execução
									7,14
C - Atividades Auxiliares		Quantidade	Unidade			Preço Unitário			Custo Unitário (R\$)
1 A 01 390 02 - Usinagem de CBUQ (capa de rolamento)		1	t			127,60			127,60
									127,60
D - Transporte de Materiais									
Cimento Asfáltico CAP 50/70		0,057							
Filler		0,028							
E - Transporte de Materiais Produzidos / Comerciais									
Areia extraída com escavadeira hidráulica		0,08							
Brita produzida em central de britagem de 80 m3/h		0,0837							
Usinagem de CBUQ (Capa de rolamento)		1							
									Soma dos custos de transporte
									5,61
									Custo Unitário Direto Total (R\$)
									140,35
									Lucro e Despesas Indiretas (26,70%)
									37,47
									Preço Unitário Total (R\$)
									177,82