

Gabriela Ceccon Carlesso

**RESISTÊNCIA À FADIGA DE DIFERENTES MISTURAS
ASFÁLTICAS: UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE
MISTURAS CONVENCIONAIS, MODIFICADAS COM
NANOARGILA E MODIFICADAS COM
BORRACHA MOÍDA DE PNEU**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Departamento de
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Catarina para
obtenção do grau de Engenheira
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Glicério
Trichês

Florianópolis
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pela autora, através do
Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC

Gabriela Ceccon, Carlesso

RESISTÊNCIA À FADIGA DE DIFERENTES MISTURAS ASFÁLTICAS:
: UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MISTURAS CONVENCIONAIS,
MODIFICADAS COM NANOARGILA E MODIFICADAS COM BORRACHA
MOÍDA DE PNEU / Carlesso Gabriela Ceccon ; orientador,
Glicério Trichês - Florianópolis, SC, 2014.

105 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

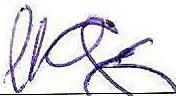
1. Engenharia Civil. 2. Resistência à fadiga. 3. Asfalto-
borracha. 4. Ligante nanomodificado. I. Trichês, Glicério.
II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

Gabriela Ceccon Carlesso

**RESISTÊNCIA À FADIGA DE DIFERENTES MISTURAS
ASFÁLTICAS: Um estudo comparativo entre misturas
convencionais, modificadas com nanoargila
e modificadas com borracha moída de pneu**

Este trabalho foi julgado adequado para a conclusão do curso de Graduação em Engenharia Civil, sendo aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 02 de dezembro de 2014.



Prof. Dr. Luis Alberto Gómez
Coordenador do Curso de Engenharia Civil

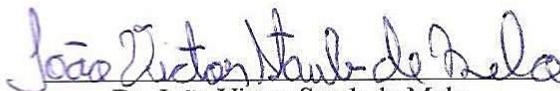
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Glicério Trichês – Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Profa. Dra. Luciana Rohde
Universidade Federal de Santa Catarina



Dr. João Victor Staub de Melo

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Edson e Claire, por todo o amor, pela
dedicação e pela presença constante
em todos os momentos da minha vida.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida e pela vida das pessoas especiais que me cercam. Por ter feito com que eu continuasse acreditando em mim, mesmo quando os obstáculos ao longo do curso de Engenharia Civil foram grandes e meus objetivos pareciam inalcançáveis.

Aos meus pais Edson e Claire, por todo amor e carinho a mim dedicados ao longo da minha vida. Por terem acreditado junto comigo. Saber que vocês estariam ao meu lado foi fundamental para que eu não desistisse diante das dificuldades que apareceram ao longo da minha caminhada. O resultado do meu esforço é “por vocês e para vocês”.

Ao meu irmão Edson Jr., por alimentar em mim o desejo de servir como exemplo e inspiração.

Ao meu namorado Marcel, pelo companheirismo durante esses cinco anos de graduação. Por ter entendido meus momentos de nervosismo e por ter me ensinado a manter a calma diante dos contratempos da vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Glicério Trichês, primeiramente por ter feito com que eu descobrisse minha afinidade com a área da Pavimentação. Por todos os ensinamentos compartilhados ao longo dos dois anos de convivência. Pela disponibilidade constante para sanar minhas dúvidas e colaborar através de sua experiência, sobretudo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do Grupo Rodovias Verdes e do Laboratório de Pavimentação da UFSC, pela ajuda ao longo da realização da parte experimental desta pesquisa. Em especial ao agora Dr. João Victor por ter cedido gentilmente e com antecedência os resultados do seu estudo, ao mestrando Matheus pelo auxílio no laboratório, e ao doutorando Quintero por compartilhar constantemente suas lições de positividade.

Aos colegas do GestCon, pela oportunidade de realizar meu estágio obrigatório em um ambiente tão acolhedor. Por terem me recebido de braços abertos e por terem compreendido algumas ausências necessárias durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, aos amigos do curso de Engenharia Civil da UFSC. Pela parceria ao longo desses cinco anos de graduação. Pela troca de conhecimentos e, principalmente, por terem feito com que eu nunca me sentisse sozinha em todo esse tempo.

“A felicidade não está na estrada que leva a algum lugar. A felicidade é a própria estrada.”
(Bob Dylan)

RESUMO

Considerando que o Brasil é um País essencialmente rodoviário, a busca pelo aprimoramento dos materiais utilizados em pavimentação tem se mostrado uma atividade extremamente necessária diante das patologias observadas em campo. Nesse sentido, a presente pesquisa buscou comparar o desempenho à fadiga de três misturas asfálticas diferentes: uma modificada com asfalto-borracha (material já consolidado no País), outra com ligante modificado por nanoargila (tecnologia recente) e, por fim, uma mistura convencional de referência. Para tornar possível a análise, foram utilizados dois modelos de fadiga desenvolvidos por Melo (2014) e um terceiro modelo obtido ao longo do desenvolvimento deste trabalho. De posse destes dados, foram então simuladas numericamente cinco estruturas de pavimento diferentes, variando-se as espessuras além dos materiais aplicados. Integrando os resultados das simulações aos modelos de fadiga, foi possível verificar, sobretudo, o melhor desempenho do asfalto-borracha em relação ao asfalto modificado com nanoargila no que diz respeito ao comportamento à fadiga dos materiais.

Palavras-chave: Resistência à fadiga. Asfalto-borracha. Ligante nanomodificado.

ABSTRACT

Acknowledging that Brazil's is a country which has roads as main source of logistics, the search for materials technologic advancement in pavement is showing itself as an important activity to improve roads and correct the pathologies found in field. This research compares performance of three different hot asphalt mixtures: one with rubber asphalt (a material already used in Brazil), the second one with nanoclay (a new technology), and the last one, a standard asphalt mixture. To be possible the comparison this research used two fatigue models developed by Melo (2014) and a third one obtained during this research. The numerical data were simulated using five different structural pavement types, changing the thickness and the materials in each structure. Combining the simulation's results with the fatigue models was possible to realize that rubber asphalt has a better fatigue performance than nano-modified asphalt with nanoclay.

Keywords: Fatigue resistance. Rubber asphalt. Nano-modified asphalt.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Seção transversal da estrutura de um pavimento flexível. .	31
Figura 2.2 - Lago de Asfalto em Trinidad.	33
Figura 2.3 - Refinaria de Paulínia (REPLAN).	34
Figura 2.4- Esquema de fabricação do asfalto-borracha via úmida.	39
Figura 2.5 - Contraste entre a aparência de um CAP convencional e do asfalto-borracha.	40
Figura 2.6 - Ilustração das diferentes escalas de análise dos materiais.	42
Figura 2.7 - Comparação entre o comportamento do material asfáltico não modificado e o comportamento superhidrofóbico do material modificado.	44
Figura 2.8 - Nanocompósitos asfálticos: (a) intercalado e (b) esfoliado.	46
Figura 2.9 - Mecanismo de barreira ao envelhecimento do ligante.	46
Figura 2.10 - Resultados de deformação permanente da mistura convencional e das nanomodificadas com 1, 2 e 3% de nanoargila.	47
Figura 2.11 - Curvas de fadiga da mistura convencional e da modificada com 3% de nanoargila.	48
Figura 2.12 - Esquema de Classificação dos Agregados.	50
Figura 2.13 - Brita 1 fina.	51
Figura 2.14 - Escória de alto forno.	52
Figura 2.15 - Ilustração de análise por peneiramento.	53
Figura 2.16 - Diferentes tamanhos de agregados utilizados na pavimentação.	55
Figura 2.17 - Esquema com graduação de agregados.	56
Figura 2.18 - Deformação permanente em trilha de roda.	58
Figura 2.19 - Trincamento devido à fadiga do revestimento.	58
Figura 2.20 - Esquema de tensões e deformações provocadas na estrutura de um pavimento devido à ação das cargas do tráfego.	59
Figura 2.21 - Equipamento de fadiga a quatro pontos.	61
Figura 2.22 - Esquema de esforços internos gerados nos corpos de prova.	61
Figura 2.23 - Resultados dos ensaios de módulo complexo de Melo (2014) para mistura asfáltica modificada com 3% de nanoargila – plano Cole-Cole.	63
Figura 2.24 - Captura de tela do ensaio de fadiga.	64
Figura 2.25 - Tela de entrada do <i>software</i> ELSYM5.	67
Figura 3.1 - Etapas da pesquisa.	69

Figura 3.2 - Mesa compactadora LCPC.....	71
Figura 4.1 - Distribuição granulométrica dos agregados.	77
Figura 4.2 - Separação e pesagem dos agregados para ensaios de fadiga.	83
Figura 4.3 - Homogeneização mecânica das misturas.	83
Figura 4.4 - Vigotas para ensaio de fadiga.....	84
Figura 4.5 - Curva de fadiga asfalto-borracha.....	86
Figura 4.6 - Curvas de fadiga ligante convencional (15°C, 10 Hz), nanomodificado (15°C e 20°C, 10 Hz) e asfalto-borracha (20°C, 10 Hz).	87
Figura 4.7 - Estruturas para simulação numérica.	91
Figura 4.8 - Configuração do carregamento utilizado na simulação numérica.....	92
Figura 4.9 - Ilustração dos resultados de vida à fadiga.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Especificação brasileira para cimento asfáltico de petróleo.	36
Tabela 2.2 - Especificação brasileira para asfalto-borracha.	41
Tabela 2.3 - Dimensões nominais das peneiras segundo a norma DNER-ME 035/95.	54
Tabela 2.4 - Modelos de fadiga de Melo (2014).	66
Tabela 4.1 - Resultado da caracterização dos agregados.	75
Tabela 4.2 - Características físicas e químicas da cal hidratada.	76
Tabela 4.3 - Distribuição granulométrica dos agregados.	76
Tabela 4.4 - Características do ligante convencional (DNIT 095/2006 – EM).	78
Tabela 4.5 - Características do ligante modificado por borracha (DNIT 111/2009 – EM).	78
Tabela 4.6 - Características do ligante modificado por 3% de nanoargila.	79
Tabela 4.7 - Propriedades volumétricas dos corpos de prova da mistura convencional.	80
Tabela 4.8 - Características dos corpos de prova da mistura com ligante asfalto-borracha.	81
Tabela 4.9 - Propriedades volumétricas dos corpos de prova da mistura modificada com nanoargila.	82
Tabela 4.10 - Dados compilados dos ensaios de fadiga (20°C, 10 Hz).	85
Tabela 4.11 - Dados das camadas de base, sub-base e subleito do pavimento simulado.	88
Tabela 4.12 - Dados das misturas convencional e com nanoargila.	88
Tabela 4.13 - Cálculo da média das componentes elásticas dos módulos complexos – mistura com asfalto-borracha.	89
Tabela 4.14 - Dados das estruturas para simulação numérica.	90
Tabela 4.15 - Resultados de deformação ELSYM5.	93
Tabela 4.16 - Resumo dos resultados de vida à fadiga.	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANIP	Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CENPES	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello da Petrobras
C-TAC	Centro de Território, Ambiente e Construção da Universidade do Minho
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ELSYM5	<i>Elastic Layered System</i>
FORTTRAN	<i>Formula Translating System</i>
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
IST	Índice de Susceptibilidade Térmica
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
NBR	Norma Brasileira
NSF	<i>National Science Foundation</i>
REPLAN	Refinaria de Paulínia
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	23
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	23
1.2 OBJETIVOS	25
1.2.1 Objetivo geral	25
1.2.2 Objetivos específicos	25
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	26
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1 ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS	29
2.2 LIGANTES ASFÁLTICOS	32
2.2.1 Ligantes asfálticos em geral.....	32
2.2.1.1 Considerações iniciais	32
2.2.1.2 Origem.....	33
2.2.1.3 Propriedades físicas.....	34
2.2.1.4 Especificações	35
2.2.2 Ligantes modificados com borracha moída de pneu.....	37
2.2.2.1 Considerações iniciais	37
2.2.2.2 Propriedades físicas.....	39
2.2.3 Ligantes modificados com nanomateriais	41
2.2.3.1 Estudos recentes	44
2.3 AGREGADOS	49
2.3.1 Considerações iniciais	49
2.3.2 Classificação.....	49
2.3.2.1 Quanto à natureza.....	50
2.3.2.2 Quanto ao tamanho.....	52
2.3.2.3 Quanto à graduação	55
2.4 ANÁLISE TENSÃO × DEFORMAÇÃO EM PAVIMENTOS	57
2.4.1 Comportamento das misturas asfálticas diante das solicitações	57
2.4.2 O fenômeno da fadiga	58
2.4.3 Caracterização da resistência à fadiga das misturas asfálticas	60
2.4.4 ELSYM5.....	66
CAPÍTULO 3 – MÉTODO DA PESQUISA.....	69
3.1 ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	70
3.2 ETAPA 2: MODELO DE FADIGA ASFALTO-BORRACHA	70
3.2.1 Moldagem e serragem de placas com asfalto-borracha	70

3.2.2 Realização de ensaios de fadiga a quatro pontos.....	71
3.2.3 Definição do modelo de fadiga – ligante asfalto-borracha	72
3.3 ETAPA 3: SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	72
3.3.1 Definição das estruturas de pavimento e carregamentos a serem simulados	72
3.3.2 Análise de tensão × deformação no programa ELSYM5	73
3.4 ETAPA 4: ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS ANALISADAS	73

CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS

RESULTADOS	75
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	75
4.1.1 Agregados	75
4.1.2 Ligantes asfálticos	77
4.1.2.1 Ligante convencional	77
4.1.2.2 Asfalto-borracha.....	78
4.1.2.3 Ligante modificado com nanoargila.....	79
4.1.3 Misturas asfálticas.....	80
4.1.3.1 Mistura convencional.....	80
4.1.3.2 Mistura modificada com asfalto-borracha.....	80
4.1.3.3 Mistura modificada com nanoargila.....	81
4.2 MODELO DE FADIGA ASFALTO-BORRACHA.....	82
4.3 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	88
4.4 ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS ANALISADAS	94

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

REFERÊNCIAS.....	101
-------------------------	------------

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

De acordo com Morilha Jr. (2004):

O Brasil é um País por excelência rodoviário. Sua malha rodoviária é a principal via de circulação de pessoas e bens e este é um patrimônio que deve ser preservado. A preservação e a ampliação de nossa malha rodoviária pavimentada é uma das principais condições para o grande salto de desenvolvimento que o País precisa.

Ainda segundo Morilha Jr. (2004), rodovias em mau estado de conservação dão origem a prejuízos diretos e significantes para os usuários, entre os quais podem ser citados maiores gastos de combustível, maiores custos de operação, acréscimo nos tempos de viagem e redução da segurança.

No mesmo sentido, Bartholomeu (2006) menciona que, além de retardar o desenvolvimento econômico do País, a má qualidade das rodovias gera um processo que pode ser conhecido como “anti-economia”. Conforme a autora, a falta de investimentos governamentais para adequar a malha rodoviária às condições regulares de uso dá origem a prejuízos individuais a serem absorvidos pelos usuários, destacando-se ainda o fato de serem necessários investimentos maiores quando a reconstrução das vias torna-se um procedimento inevitável.

Dessa forma, além da importância econômica para o desenvolvimento brasileiro, de um modo geral, a falta de qualidade dos pavimentos acarreta também prejuízos individuais à população, tanto no âmbito financeiro quanto no âmbito da segurança.

Assim, considerando a relevância da malha rodoviária brasileira para o País e, de modo direto, para os usuários das vias, é fundamental a compreensão da situação atual dos pavimentos rodoviários, bem como a busca pelo aprimoramento dos materiais e das técnicas utilizadas na pavimentação.

Nesse sentido, podem-se destacar os avanços verificados na área de modificação de ligantes, salientando-se aqui o desenvolvimento de ligantes modificados com borracha e com nanomateriais. Tais técnicas têm como objetivo a obtenção de melhorias no que diz respeito ao

desempenho das misturas asfálticas em campo durante a vida útil da rodovia.

Com esse objetivo, de acordo com Faxina (2006), estudos acerca da adição de borracha de pneu em misturas asfálticas têm sido desenvolvidos nos Estados Unidos desde a década de 1960 e no Brasil desde a década de 1990. Essa técnica se consolidou na prática devido a sua eficiência e, segundo o mesmo autor, até o ano de 2006, já haviam sido executados cerca de 2000 km de rodovias com ligante asfalto-borracha no Brasil.

Fontes (2009) desenvolveu pesquisa em que caracterizou, entre outros, o comportamento à fadiga de misturas asfálticas confeccionadas com adição de borracha de pneus inservíveis.

A aplicação de ligantes nanomodificados, por outro lado, é uma tecnologia mais recente e ainda não se consolidou no ramo rodoviário. Segundo Pereira, Freitas e Nascimento (2011), estudos a respeito da aplicação dos nanomateriais na Construção Civil passaram a ser desenvolvidos somente a partir da década de 2000, quando a Comissão do Parlamento Europeu aprovou o financiamento de um importante projeto na área. A partir daí, nesse sentido, pesquisas foram sendo desenvolvidas a nível mundial, de modo a constatar que, apesar de recente, o uso de nanoprodutos na modificação de ligantes tem se mostrado uma técnica eficaz diante da problemática de fadiga e deformação permanente.

Melo (2014) desenvolveu uma pesquisa sobre a eficiência da incorporação de nanoprodutos no desempenho de misturas asfálticas quanto à deformação permanente e a fadiga. No trabalho desenvolvido, o autor utilizou como mistura de referência (com CAP 50/70) uma mistura empregada em um Segmento Monitorado¹ executado no contorno de Araranguá, na duplicação da BR 101 Sul. Preservando a mesma granulometria, o autor modificou a mistura adicionando nanoprodutos (nanotubo de carbono e nanoargila).

Neste Trabalho de Conclusão de Curso, apresenta-se a caracterização do comportamento à fadiga de uma mistura asfáltica confeccionada com asfalto-borracha empregada em outro Segmento Monitorado executado no contorno de Araranguá, na duplicação da BR 101 Sul.

¹ Os Segmentos Monitorados fazem parte de um projeto de pesquisa coordenado pela Rede Temática de Tecnologia do Asfalto, patrocinado pela Petrobras, cujo objetivo é o desenvolvimento de um novo método brasileiro de dimensionamento de pavimentos flexíveis.

Assim, nos Segmentos Monitorados de Araranguá, tem-se a caracterização do comportamento à fadiga da mistura convencional, da mistura com asfalto-borracha e também a caracterização de uma mistura modificada com nanoargila (porém esta não aplicada em campo), na qual se preservou a mesma granulometria.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise comparativa entre as estruturas dos Segmentos Monitorados do Contorno de Araranguá, considerando o comportamento à fadiga de três tipos de misturas asfálticas, duas delas (misturas convencional e mistura com nanoargila) estudadas por Melo (2014) e a terceira (asfalto-borracha) estudada ao longo deste Trabalho de Conclusão de Curso. Na análise conduzida, o critério a ser utilizado foi a estimativa da vida útil do pavimento executado nos segmentos, considerando-se os 3 tipos de misturas.

1.2.2 Objetivos específicos

De modo a atingir o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Estudar o fenômeno de fadiga dos revestimentos asfálticos, bem como a abordagem adotada em laboratório para a caracterização do comportamento à fadiga das misturas asfálticas;
- b) Obter um modelo de fadiga para a mistura com ligante asfalto-borracha, preservando-se a granulometria das misturas estudadas por Melo (2014);
- c) Realizar simulações numéricas que permitam a análise das deformações verificadas na base dos revestimentos asfálticos das estruturas de pavimento executadas nos Segmentos Monitorados do contorno de Araranguá;
- d) Estimar a resistência à fadiga das diferentes estruturas a partir dos modelos desenvolvidos por Melo (2014) para mistura convencional e mistura modificada com nanoargila e do modelo desenvolvido neste trabalho para mistura com asfalto-borracha;

- e) Comparar os resultados verificados para as diferentes condições estudadas.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para atingir o objetivo, o trabalho foi estruturado da seguinte forma:

- *CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS*

Apresenta uma justificativa para o desenvolvimento do trabalho por meio da análise da importância da qualidade das rodovias no cenário brasileiro. Demonstra a necessidade de um estudo comparativo entre ligantes convencionais, modificados com borracha e nanomodificados. Relaciona o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa, estabelecendo os propósitos a serem atingidos ao longo deste estudo.

- *CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA*

Apresenta, de maneira geral, a estrutura de um pavimento rodoviário, dando posterior ênfase aos pavimentos flexíveis e aos materiais constituintes dos revestimentos asfálticos (ligantes e agregados). Trata, de maneira especial, dos ligantes modificados com borracha moída de pneu e dos ligantes modificados com nanoprodutos. Explora o comportamento dos concretos betuminosos quando solicitados pelo tráfego, apresentando o fenômeno de fadiga que ocorre ao longo de sua vida útil e sua correspondente caracterização em laboratório. Por fim, apresenta o programa ELSYM5, o qual foi utilizado na simulação numérica e permitiu, em conjunto com os modelos de fadiga, a estimativa da vida à fadiga das diferentes misturas consideradas neste trabalho.

- *CAPÍTULO 3 - MÉTODO E MATERIAIS DA PESQUISA*

Define e detalha a sequência do método adotado para que se atinjam os objetivos do trabalho, especificando também as normas utilizadas para fundamentar o procedimento experimental. Também apresenta os materiais utilizados no desenvolvimento do modelo de fadiga da mistura com asfalto-borracha.

- *CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS*

Apresenta os resultados obtidos ao longo dos procedimentos adotados na realização da pesquisa, analisando suas implicações de acordo com os objetivos inicialmente propostos.

- *CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES*

Sintetiza as conclusões obtidas com o desenvolvimento da pesquisa, expondo de forma direta a influência dos resultados no contexto avaliado. Também apresenta propostas e recomendações para estudos futuros na mesma área.

Por fim, são listadas as referências consultadas para a concepção da presente pesquisa.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS

Para Bernucci *et al.* (2008), um pavimento deve ser entendido como uma estrutura composta por múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre uma superfície final de terraplenagem.

Nesse sentido, a NBR 7207/1982, Norma Brasileira vigente de Pavimentação, define um pavimento da seguinte maneira, dando ênfase a sua finalidade:

Pavimento é uma estrutura construída após a terraplenagem e destinada, econômica e simultaneamente, em seu conjunto, a: a) resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego; b) melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança; c) resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.

De maneira sintética, Bernucci *et al.* (2008) reiteram que a estrutura de um pavimento tem como objetivo resistir aos esforços provenientes da circulação de veículos e do clima, de modo a permitir que os usuários trafeguem com conforto, economia e segurança.

Tratando-se da composição da estrutura, de acordo com a NBR 7207/1982, um pavimento é composto pelas seguintes camadas: subleito, sub-base, base e revestimento.

O subleito, conforme a NBR 7207/1982, consiste no “terreno de fundação do pavimento ou do revestimento”.

A sub-base, por sua vez, é definida pela mesma norma como sendo:

Camada corretiva do subleito, ou complementar à base, quando por qualquer circunstância não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito obtido pela terraplenagem.

No que diz respeito à camada de base, a NBR 7207/1982 a define como uma “camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos sobre a qual se constrói um revestimento”.

Por fim, o revestimento é definido como:

Camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e destinada à econômica e simultaneamente:

- a) melhorar as condições do rolamento quanto à comodidade e segurança;
- b) a resistir aos esforços que nele atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento (ABNT, 1982).

Em relação à classificação, segundo Bernucci *et al.* (2008), os pavimentos podem ser tradicionalmente classificados em rígidos e flexíveis, de acordo com a natureza do revestimento.

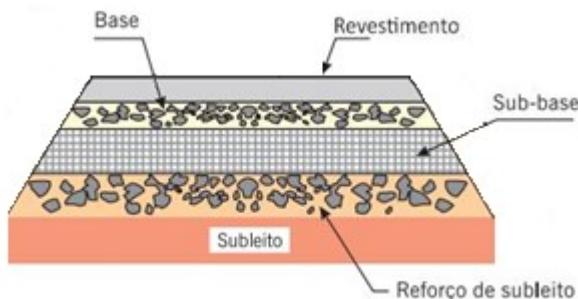
Nesse sentido, para Bernucci *et al.* (2008), os pavimentos rígidos são aqueles em que o revestimento é constituído por placas de concreto de cimento Portland. Os pavimentos flexíveis, por sua vez, apresentam como revestimento uma mistura composta basicamente de agregados e ligantes asfálticos.

Outras literaturas, entretanto, ainda consideram a existência e definição de outras tipologias de pavimentos além daquelas já mencionadas. O Manual de Pavimentação do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) (2006a), por exemplo, aponta a existência de uma terceira classe – a dos pavimentos semirrígidos, que constituem basicamente uma combinação das duas classes expostas anteriormente.

Para o presente trabalho, no entanto, são tomados como objeto de estudo somente os pavimentos flexíveis, sobretudo as camadas de revestimento constituídas por concreto asfáltico. Nesse sentido, o concreto asfáltico é definido pela Norma DNIT 031/2006 - ES (2006c) como uma mistura composta por agregados graduados, material de enchimento (se necessário) e cimento asfáltico, a qual deve ser executada a quente.

De maneira geral, para Bernucci *et al.* (2008), um pavimento flexível é formado pelas seguintes camadas: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. Contudo, de acordo com o tráfego e os materiais disponíveis, uma ou mais camadas podem ser suprimidas. A Figura 2.1 apresenta um corte esquemático de um pavimento flexível.

Figura 2.1 - Seção transversal da estrutura de um pavimento flexível.



Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2008).

Conforme é possível observar na Figura 2.1, o revestimento asfáltico é a camada superior do pavimento. Essa camada tem como objetivo, conforme já foi apresentado, resistir de maneira direta às ações do tráfego, transmitindo-as para as camadas inferiores, bem como impermeabilizar o pavimento e proporcionar condições adequadas de rolamento (ABNT, 1982).

Nesse sentido, segundo Bernucci *et al.* (2008), as misturas asfálticas que dão origem aos revestimentos asfálticos convencionais têm se mostrado capazes de cumprir sua função em condições correntes (volume de tráfego e cargas regulares). No entanto, considerando-se o crescente volume de veículos comerciais e do peso por eixo, além do tráfego pesado canalizado e para condições desfavoráveis de clima, vem se apresentando cada vez mais necessária a aplicação de produtos que melhorem o desempenho dos revestimentos em campo.

Assim, se introduz o conceito da adição de produtos modificadores às misturas asfálticas, com o objetivo de aperfeiçoar o comportamento dos revestimentos diante de solicitações desfavoráveis. Esse é o caso tanto da utilização de ligantes asfalto-borracha quanto da aplicação de nanoprodutos modificadores, conforme é apresentado posteriormente. A seguir, são explorados tópicos relacionados aos componentes das misturas convencionais (ligantes e agregados), o que permite uma melhor compreensão acerca do desempenho das misturas asfálticas.

2.2 LIGANTES ASFÁLTICOS

2.2.1 Ligantes asfálticos em geral

2.2.1.1 Considerações iniciais

De acordo com o Glossário do *Asphalt Institute* (2011), o termo asfalto refere-se a um material com propriedades cimentícias, cuja cor varia do marrom escuro ao preto, apresentando como principal componente o betume e podendo ser obtido diretamente na natureza ou através de um processamento do petróleo.

Tratando-se de características físicas, quanto à consistência, Pamplona (2013) menciona o fato de que os asfaltos apresentam comportamento de material semissólido a temperaturas reduzidas e líquido a altas temperaturas. A autora ainda aponta a influência desse comportamento no que diz respeito às patologias de deformação permanente e fadiga, problemática que é tratada posteriormente em um tópico específico.

A nível molecular, aplicando uma abordagem química, Bernucci *et al.* (2008) definem o asfalto como uma mistura de hidrocarbonetos, a qual é constituída principalmente por betume, apresentando ainda outros componentes em menores proporções. O betume, por sua vez, é definido por Bernucci *et al.* (2008) como uma mistura de hidrocarbonetos que se apresenta solúvel na presença de bissulfeto de carbono.

Apesar da semelhança entre as definições, entende-se, portanto, que o betume constitui um dos componentes do asfalto, sendo este último o material aplicado em pavimentação como ligante.

Ainda que haja uma diferenciação entre os conceitos na prática, Bernucci *et al.* (2008) destacam a tendência europeia em aplicar o termo betume para definir o ligante obtido a partir da destilação do petróleo, enquanto nos países americanos se observa uma predominância do próprio termo asfalto para se referir ao material em questão.

Quando apresenta qualidade e consistência adequadas para a aplicação direta na construção de pavimentos, segundo a norma DNIT 095/2006 – EM (2006d), um asfalto recebe a denominação de cimento asfáltico de petróleo (CAP).

De forma a justificar seu uso significativo na área de pavimentação, podem ser citadas as propriedades notáveis dos asfaltos, entre as quais constam sua capacidade de manter unidos os agregados e

a impermeabilização de superfícies, além de os mesmos serem resistentes à ação de ácidos, álcalis e sais (BERNUCCI *et al*, 2008).

2.2.1.2 Origem

De acordo com o *Asphalt Institute* (2011), os asfaltos podem ocorrer de maneira natural ou serem obtidos a partir de processamentos do petróleo.

Um exemplo de asfalto encontrado em jazida natural pode ser observado na Figura 2.2, que consiste em uma imagem fotografada no *Trinidad Lake Asphalt*, localizado no sudoeste da ilha de Trinidad.

Entretanto, apesar de existirem na natureza e terem sido usados ao longo de mais de 5000 anos para as mais diversas atividades humanas, Bernucci *et al.* (2008) atentam para o fato de que, no início do século XX, com o desenvolvimento das técnicas de refino para obtenção de asfaltos provenientes do petróleo, os asfaltos naturais passaram a ter seu uso restrito.

Atualmente, de acordo com os mesmos autores, a maior parte dos asfaltos utilizados no mundo é proveniente do processo de destilação do petróleo, o que acontece em locais específicos denominados refinarias. A Figura 2.3 apresenta uma torre de destilação da Refinaria de Paulínia, em São Paulo.

Figura 2.2 - Lago de Asfalto em Trinidad.



Fonte: Tuchumantel Junior (2011).

Nas refinarias, como o próprio nome sugere, o petróleo passa pelo refino que, para Neiva (1983 *apud* MARIANO, 2001), é entendido como um conjunto de beneficiamentos ao qual o petróleo é submetido, incluindo etapas físicas e químicas de separação, que tem como objetivo final a obtenção de seus derivados.

Figura 2.3 - Refinaria de Paulínia (REPLAN).



Fonte: Acervo REPLAN *apud* Memória Petrobrás (2010).

Conhecidas as formas de obtenção, são apresentadas a seguir as propriedades físicas dos ligantes asfálticos.

2.2.1.3 Propriedades físicas

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), “todas as propriedades físicas do asfalto estão associadas a sua temperatura”. Segundo os autores, isso ocorre devido ao afastamento ou a aproximação de suas moléculas. Em temperaturas muito altas as moléculas se afastam, tornando o ligante um material menos viscoso. Por outro lado, em baixas temperaturas as moléculas se aproximam, aumentando a viscosidade do material. Desta maneira, todos os ensaios realizados em laboratório para mensurar as propriedades dos ligantes devem ser feitos em temperatura especificada.

Segundo Faxina (2006), além da temperatura, outros fatores que exercem grande influência no comportamento dos ligantes são o nível das tensões aplicadas e o tempo de atuação dos carregamentos.

Nesse sentido, os ligantes asfálticos são materiais genuinamente viscoelásticos, apresentando as componentes elástica, responsável por armazenar trabalho aplicado, e viscosa, responsável pela dissipação de trabalho aplicado (FAXINA, 2006).

Na sequência são brevemente apresentadas algumas das propriedades dos ligantes asfálticos, de acordo com Bernucci *et al.* (2008), as quais são avaliadas através de ensaios padronizados e foram utilizadas para a caracterização dos ligantes empregados nesta pesquisa:

- Penetração: avalia a resistência do ligante à penetração de uma agulha com massa padrão numa determinada amostra, sendo medida em décimos de milímetro;

- Viscosidade: é a medida da consistência do ligante, caracterizando a resistência do material ao escoamento. Pode ser dada em segundos ou centipoise, de acordo com o tipo de ensaio realizado;

- Ponto de amolecimento: mede a temperatura necessária para que o asfalto amoleça em condições específicas;

- Ductilidade: avalia a coesão do ligante diante do seu alongamento em forma de um filamento. É dada em centímetros;

- Ponto de fulgor: representa a menor temperatura para que ocorra a inflamação dos vapores emanados do asfalto durante seu aquecimento em contato com uma chama padronizada.

Bernucci *et al.* (2008) mencionam que essas propriedades, bem como índices obtidos a partir delas, são de fundamental importância para as especificações relacionadas aos CAPs, como é mostrado no tópico a seguir.

2.2.1.4 Especificações

Segundo a Resolução ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis) n° 19, de 11 de julho de 2005, a prescrição de especificações para o cimento asfáltico comercializado no território brasileiro tem como objetivo estabelecer padrões de classificação e qualidade para o material.

Para tanto, a especificação vigente no Brasil desde o ano de 2005 (Tabela 2.1) classifica os CAPs convencionais de acordo com a penetração, mencionando também limites para as outras propriedades já citadas (ANP, 2005).

Conforme se pode observar na Tabela 2.1 e segundo Bernucci *et al.* (2008), os cimentos asfálticos de petróleo são identificados no Brasil com a sigla CAP seguida por indicadores numéricos. Tais indicadores representam os resultados dos ensaios de penetração feitos no ligante a uma temperatura de 25°C. Assim, da forma como se estabeleceu, a especificação brasileira atualmente classifica os CAPs em quatro grupos distintos, relacionando resultados de ensaios à temperatura de 25°C e as temperaturas de usinagem, não mencionando, entretanto, ensaios que expressem o comportamento dos materiais durante sua vida em serviço.

Tabela 2.1 - Especificação brasileira para cimento asfáltico de petróleo.

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS	
		CAP 30 45	CAP 50 70	CAP 85 100	CAP 150 200	ABNT	ASTM
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 45	50 70	85 100	150 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, min	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade SayboltFuroil	s					NBR 14950	E 102
a 135 °C, mín		192	141	110	80		
a 150 °C, mín		90	50	43	36		
a 177 °C		40 150	30 150	15 60	15 60		
OU							
Viscosidade Brookfield	cP					NBR 15184	D 4402
a 135°C, SP		374	274	214	155		
21, 20 rpm, mín		203	112	97	81		
a 150 °C, SP							
21, mín.							
a 177 °C, SP 21		76 285	57 285	28 114	28 114		
Índice de susceptibilidade térmica (1)		(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)		
Ponto de fulgor mín	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Ductilidade a 25° C, mín	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min							D 2872
Varição em massa, máx (2)	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		
Ductilidade a 25° C, mín	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín (3)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

Fonte: ANP (2005).

Apresentada a especificação brasileira para os CAPs convencionais, são apresentados na sequência os ligantes modificados com borracha moída de pneu. Posteriormente são explorados os ligantes modificados com nanomateriais.

2.2.2 Ligantes modificados com borracha moída de pneu

2.2.2.1 Considerações iniciais

De acordo com Faxina (2006), as primeiras experiências relacionadas à adição de borracha de pneus inservíveis às misturas asfálticas foram realizadas nos Estados Unidos da América, na década de 1960. Segundo o autor, tal tema passou a ser abordado no Brasil somente no início da década de 1990, em algumas universidades e centros de pesquisa.

A prática da adição de borracha de pneus inservíveis às misturas asfálticas, conforme Fontes (2009), além de propiciar melhorias ao desempenho do revestimento asfáltico, também possui um apelo ambiental, visto que proporciona um destino adequado para os resíduos em questão.

Esses resíduos, de acordo com Pinheiro *et al.* (2003), costumam ser descartados em campos, terrenos baldios, aterros sanitários, córregos ou até mesmo queimados a céu aberto, dando origem a inúmeros problemas ambientais.

Nesse sentido, conforme a ANIP (Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos), foram produzidas 68,8 milhões de unidades de pneus no Brasil no ano de 2013. Em 2001, de acordo com a ANIP, esse número era de 38 milhões, o que demonstra um grande salto na produção e a crescente necessidade de que sejam adequadamente destinados após sua utilização.

Considerando essa problemática, conforme Amirhanian (2001 *apud* FONTES, 2009), 2 a 6 pneus inservíveis podem ser adicionados a cada tonelada de mistura asfáltica modificada, destinando de forma apropriada tal resíduo sólido.

Segundo Fontes (2009), para utilização como agente modificador, a borracha proveniente de pneus inservíveis é triturada, procedimento que pode ser executado de duas formas: à temperatura ambiente ou a temperaturas criogênicas (inferiores a -120°C). De acordo com Baker *et al.* (2003 *apud* FONTES, 2009), a borracha triturada pelos dois

processos distintos dá origem a ligantes com características também distintas.

Tratando-se das técnicas utilizadas para incorporar a borracha às misturas, por outro lado, também podem ser considerados dois processos distintos: processo seco e processo úmido. No processo seco, os resíduos de borracha são triturados e adicionados à mistura como se fossem agregados. No processo úmido, por sua vez, a borracha moída é incorporada ao ligante antes que este seja misturado aos agregados (FAXINA, 2006).

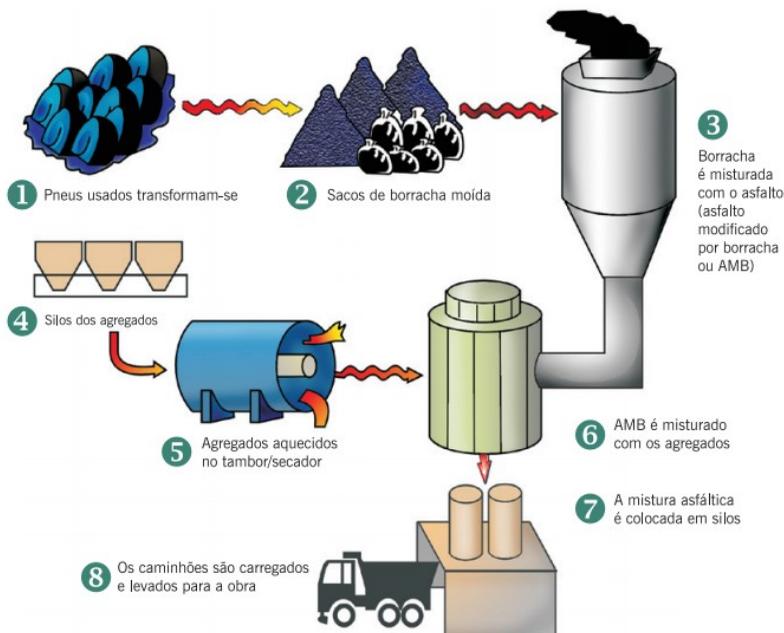
Assim, de acordo com a norma DNIT 111/2009 – EM (2006e), o asfalto-borracha resultante do processo úmido é definido da seguinte maneira:

Cimento asfáltico de petróleo modificado pela adição por processo via úmida, de borracha moída de pneus inservíveis (partículas passantes na peneira n° 40), resultando em uma mistura na qual a borracha representa geralmente de 15 a 20% da massa do ligante.

O asfalto-borracha resultante do processo por via úmida pode ser de dois tipos: estocável (*terminal blending*) e não estocável (*continuous blending*). O primeiro é preparado em um terminal especial, produzindo um ligante estável e homogêneo, que é posteriormente transportado para as obras de acordo com a necessidade. O segundo, por outro lado, é resultante de um processo de mistura realizado com equipamento misturador na própria obra, devendo ser utilizado de imediato devido a sua instabilidade (BERTOLLO *et al.*, 2003 *apud* BERNUCCI *et al.*, 2008; MORILHA, 2004 *apud* BERNUCCI *et al.*, 2008). A Figura 2.4 apresenta um esquema da fabricação de asfalto-borracha por via úmida estocável.

Dessa maneira, definido o material asfalto-borracha e as maneiras para obtenção do mesmo, é apresentada no tópico a seguir uma breve comparação entre as características deste e dos ligantes convencionais, justificando o crescimento e a consagração do seu uso na Pavimentação Rodoviária.

Figura 2.4- Esquema de fabricação do asfalto-borracha via úmida.



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

2.2.2.2 Propriedades físicas

Segundo Fontes (2009), as propriedades dos ligantes asfalto-borracha são comumente avaliadas de maneira semelhante aos ligantes convencionais. Existem propriedades, entretanto, como a recuperação elástica, que geralmente são avaliadas para ligantes modificados com borracha e não costumam ser mensuradas em ligantes convencionais.

A recuperação elástica, nesse sentido, varia entre 0 e 5% para ligantes convencionais, enquanto que para ligantes modificados com borracha varia entre 40 e 50% (HICKS e EPPS, 2000 *apud* FONTES, 2009).

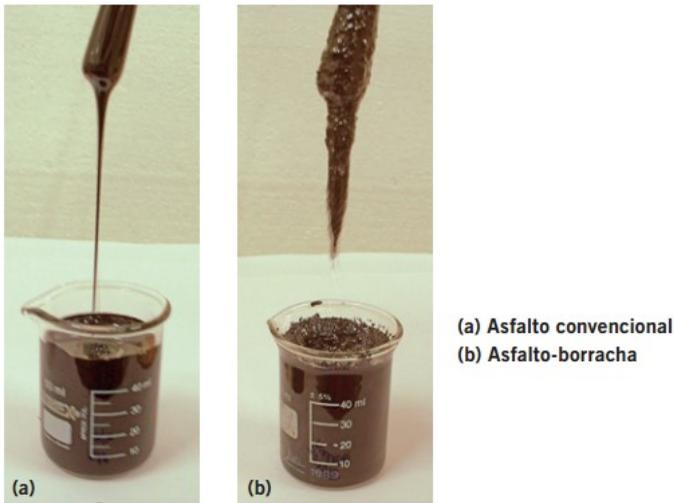
No que diz respeito à viscosidade, TFHRC (2005 *apud* FONTES, 2009), menciona que os ligantes modificados por borracha apresentam maiores valores, o que melhora seu desempenho em campo à deformação permanente, por exemplo.

Outra propriedade notável é o elevado ponto de amolecimento em relação aos ligantes convencionais. Essa propriedade contribui para melhorias no seu desempenho à deformação permanente e a fadiga em campo (TFHRC, 2005 *apud* FONTES, 2009).

Segundo Roberts *et al.* (1989 *apud* FONTES, 2009), e Hicks e Epps (2000 *apud* FONTES, 2009), os valores de penetração também são influenciados. Nesse sentido, de acordo com os autores, a adição da borracha faz com que a penetração na temperatura de 25°C seja diminuída.

Mesmo em termos de aparência, também pode ser constatada a diferença entre o asfalto-borracha e o CAP convencional. A Figura 2.5 ilustra o contraste entre os dois tipos de ligantes.

Figura 2.5 - Contraste entre a aparência de um CAP convencional e do asfalto-borracha.



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

Em termos de especificação, os requisitos brasileiros para o asfalto-borracha estocável encontram-se na Tabela 2.2. Tais requisitos foram regulamentados pela Resolução ANP N° 39, de 24.12.2008 – DOU 26.12.2008.

Tabela 2.2 - Especificação brasileira para asfalto-borracha.

CARACTERÍSTICA TIPO	UNIDADE	LIMITE		MÉTODO	
		AB8	AB22	ABNT/NBR	ASTM
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1 mm	30 – 70		6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	50	55	6560	D 36
Viscosidade Brookfield a 175°C, spindle 3, 20 rpm, máx.	cP	800-2000	2200-4000	15529	D 2196
Ponto de fulgor, mín.	°C	235		11341	D 92
Estabilidade à Estocagem, máx.	°C	9		15166	D 7173
Recuperação Elástica a 25° C, 10 cm, mín.	%	50	55	15086	D 6084
Varição em massa do RTFOT, máx	% massa	1,0		15235	D 2872
Ensaio no Resíduo RTFOT					
Varição do ponto de amolecimento, máx.	°C	10		6560	D 36
Porcentagem de Penetração original, mín.	%	55		6576	D 5
Porcentagem de Recuperação Elástica Original (25°C, 10 cm) mín.	%	100		15086	D 6084

Fonte: ANP (2008).

Apresentada a especificação brasileira para o asfalto-borracha, passa-se para a apresentação dos ligantes nanomodificados que, conforme já mencionado, também são foco de comparação ao longo deste estudo.

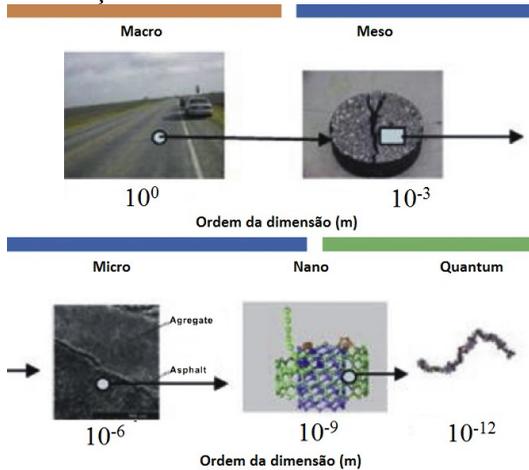
2.2.3 Ligantes modificados com nanomateriais

De acordo com Zhang *et al.* (2005 *apud* FANG *et al.*, 2013), os nanomateriais são materiais de escala nanométrica, os quais apresentam propriedades especiais propiciadas pelas suas dimensões reduzidas. A Figura 2.6 ilustra os diferentes tamanhos dos materiais, tomando como exemplo as escalas de análise do concreto asfáltico. Pode-se observar que os nanomateriais possuem dimensões da ordem de 10^{-9} m.

Nesse sentido, de acordo com Grajales (2011), a nanotecnologia é assim definida:

Nanotecnologia é a criação e fabricação de materiais, dispositivos e sistemas funcionalmente úteis, através do controle da matéria em escala nanométrica (atômica ou molecular), assim como a exploração de novos fenômenos e propriedades (físicas, químicas, biológicas etc.) que se apresentam em uma dimensão menor que 100nm ($1\text{nm} = 10^{-6}\text{mm}$).

Figura 2.6 - Ilustração das diferentes escalas de análise dos materiais.



Fonte: Adaptado de Steyn (2009, *apud* FANG *et al.*, 2013).

Conforme Pereira, Freitas e Nascimento (2011), atualmente vários segmentos da indústria têm trabalhado com técnicas de aplicação de nanotecnologia e de nanomateriais. Entre esses segmentos, os autores mencionam a Indústria da Construção Civil como pioneira, identificando o potencial desse tipo de tecnologia logo no início da década de 1990, com a UK Delphi.

Após a identificação desse potencial, ao longo de 10 a 15 anos foi constatada a possível influência da aplicação da nanotecnologia entre os 40 setores industriais existentes. Observou-se, nesse contexto, a possibilidade da aplicação dos nanomateriais na tecnologia do concreto e da pavimentação (PEREIRA; FREITAS; NASCIMENTO, 2011).

Por esse motivo, no ano de 2002, foi aprovado pela Comissão do Parlamento Europeu um financiamento para o desenvolvimento do Projeto GMA1-2002-72160 “NANOCOMEX” – Rumo à criação de uma Rede de Excelência em Nanotecnologia na Construção Civil. Entre

as tarefas de tal projeto, constava a elaboração de um relatório, no período de 12 meses, englobando o estado da arte da Nanotecnologia na Engenharia Civil, bem como um planejamento para a aplicação do potencial da nanotecnologia nesse setor. O projeto acabou figurando como o ponto de partida para o desenvolvimento de outras pesquisas acerca da aplicação da nanotecnologia na área, inclusive no âmbito da Pavimentação Rodoviária (PEREIRA; FREITAS; NASCIMENTO, 2011).

Em agosto de 2006, foi realizado nos Estados Unidos um importante *workshop*, o *Nanomodification of Cementitious Materials*, organizado pela *National Science Foundation (NSF)*, tendo como objetivo explorar a utilização da nanotecnologia na obtenção de concretos asfálticos. Entre as conclusões do evento, na época, destacou-se a ideia de que a nanotecnologia já possuía potencial para conduzir melhorias na área da pavimentação asfáltica (YOU *et al.*, 2011 *apud* YANG e TIGHE, 2013; SHEN, 2011 *apud* YANG e TIGHE, 2013).

Nesse sentido, entre os estudos desenvolvidos na área, de acordo com Yang e Tighe (2013), a adição de nanomateriais como nanoargilas, nanosílica e nanotubos às misturas asfálticas normalmente provoca um aumento na viscosidade do ligante, além de melhorar a resistência das misturas às patologias de trilhas de roda e de trincamento por fadiga.

No mesmo sentido, Fang *et al.* (2013) aponta que a modificação dos ligantes com nanomateriais permite a obtenção de melhorias no comportamento desses materiais, tais como progressos nas características de aderência, susceptibilidade térmica e resistência ao envelhecimento ou durabilidade.

Tratando-se dos nanomateriais aplicados na pavimentação, Grajales (2011) menciona que pesquisas vem sendo feitas atualmente com os seguintes nanoprodutos: nanoargilas, nanoemulsões e microemulsões com nanopartículas de dióxido de titânio, pó de nanoborracha modificada e polímero EVA com nanoargila. O autor ressalta que essas pesquisas constituem apenas uma pequena amostra do potencial envolvendo a aplicação da nanotecnologia na pavimentação.

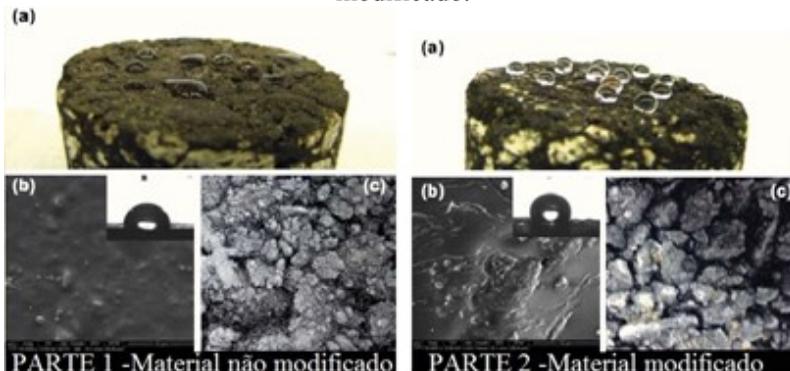
Assim, são apresentados na sequência alguns estudos recentes realizados acerca da aplicação da nanotecnologia na pavimentação rodoviária, de modo a explorar seu desenvolvimento à nível mundial. Apesar de alguns estudos não estarem diretamente ligados à problemática brasileira que é objeto deste trabalho, os mesmos permitem atestar os potenciais progressos relacionados à nanotecnologia na área de pavimentação asfáltica.

2.2.3.1 Estudos recentes

Entre os grupos que atualmente vem estudando a aplicação dos nanomateriais na pavimentação, encontra-se o grupo de Infraestruturas de Transporte do Centro de Território, Ambiente e Construção da Universidade do Minho – C-TAC – Portugal, caracterizando-se por ser pioneiro na Europa no que diz respeito ao estudo da aplicação da nanotecnologia para a área de pavimentação (PEREIRA; FREITAS; NASCIMENTO, 2011).

O grupo desenvolveu recentemente uma pesquisa acerca da aplicação da nanotecnologia em relação à repelência do concreto asfáltico à água e ao gelo, comportamento conhecido como superhidrofobicidade. Tal estudo justificou-se devido ao problema sofrido por países de clima frio, com a ocorrência da formação de gelo nas rodovias (PEREIRA; FREITAS; NASCIMENTO, 2011). Os resultados obtidos pela equipe portuguesa podem ser observados na Figura 2.7, que apresenta uma comparação entre o material asfáltico não modificado com nanopartículas e o material modificado.

Figura 2.7 - Comparação entre o comportamento do material asfáltico não modificado e o comportamento superhidrofóbico do material modificado.



- (a) comportamento visível dos materiais
- (b) imagens de microscopia eletrônica
- (c) imagens que representam a formação de cristais de gelo

Fonte: Adaptado de Pereira, Freitas e Nascimento (2011).

Além do estudo acerca da superhidrofobicidade, o grupo de Infraestruturas de Transporte do C-TAC da Universidade do Minho

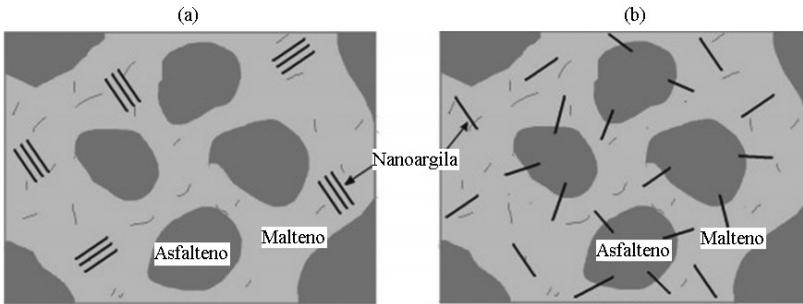
também vem desenvolvendo estudos acerca da aplicação de nanomateriais na pavimentação com o objetivo de reduzir a poluição atmosférica proveniente do tráfego de veículos. Para tanto, são adicionadas aos revestimentos as chamadas nanopartículas semicondutoras dopadas. Nesse sentido, observou-se na última década um notável interesse no que diz respeito ao desenvolvimento de nanomateriais capazes de diminuir a poluição atmosférica, sobretudo nos países da Europa e no Japão (PEREIRA; FREITAS; NASCIMENTO, 2011).

No mesmo âmbito, Melo e Trichês (2010) realizaram estudo no qual verificaram a eficiência da nanomodificação da superfície de *pavers* para purificação do ar em meio urbano. Os resultados do estudo demonstraram que as peças catalíticas desenvolvidas são capazes de alcançar taxas de conversão do poluente avaliado (10 ppm – NO) de até 50% considerando uma área fotocatalítica de 1200 cm².

Por outro lado, Fang *et al.* (2013) estudaram outra vertente da nanotecnologia, a qual se baseia na preocupação com o envelhecimento dos ligantes. De acordo com Shen (2011 *apud* FANG *et al.*, 2013), o envelhecimento dos ligantes consiste em um dos principais problemas relacionados à degradação dos pavimentos, podendo ser dividido em envelhecimento a curto prazo e envelhecimento a longo prazo. Segundo o mesmo autor, o envelhecimento a curto prazo é causado pela usinagem, transporte e compactação da mistura asfáltica, enquanto que o envelhecimento a longo prazo é causado pela oxidação em serviço da mistura.

Assim, para melhorar o comportamento dos ligantes diante do envelhecimento, diversos estudos têm incorporado nanoargila em matrizes asfálticas, dando origem a nanocompósitos intercalados ou esfoliados (ZHANG *et al.*, 2005 *apud* FANG *et al.*, 2013; POLACCO *et al.*, 2008 *apud* FANG *et al.*, 2013; YU *et al.*, 2009, 2010, 2011 *apud* Fang *et al.*, 2013). Esses tipos de nanocompósitos podem ser observados na Figura 2.8.

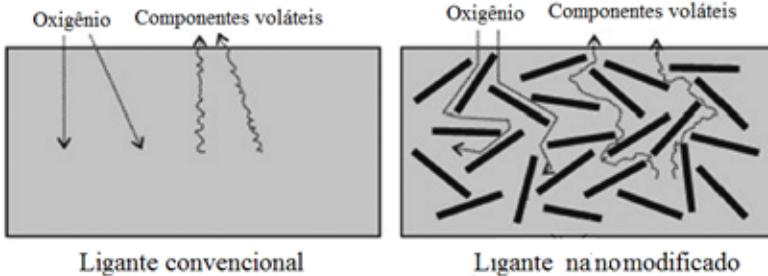
Figura 2.8 - Nanocompósitos asfálticos: (a) intercalado e (b) esfoliado.



Fonte: Adaptado de Jahromi e Khodaii (2009 *apud* FANG *et al.*, 2011).

Esses nanocompósitos, de acordo com Zhang *et al.* (2005 *apud* FANG *et al.*, 2013), Polacco *et al.* (2008 *apud* FANG *et al.*, 2013) e Yu *et al.* (2009, 2010, 2011 *apud* FANG *et al.*, 2013), sobretudo o esfoliado, têm a capacidade de produzir uma espécie de barreira no ligante contra a oxidação e perda dos componentes voláteis. A Figura 2.9 apresenta o princípio desse mecanismo.

Figura 2.9 - Mecanismo de barreira ao envelhecimento do ligante.



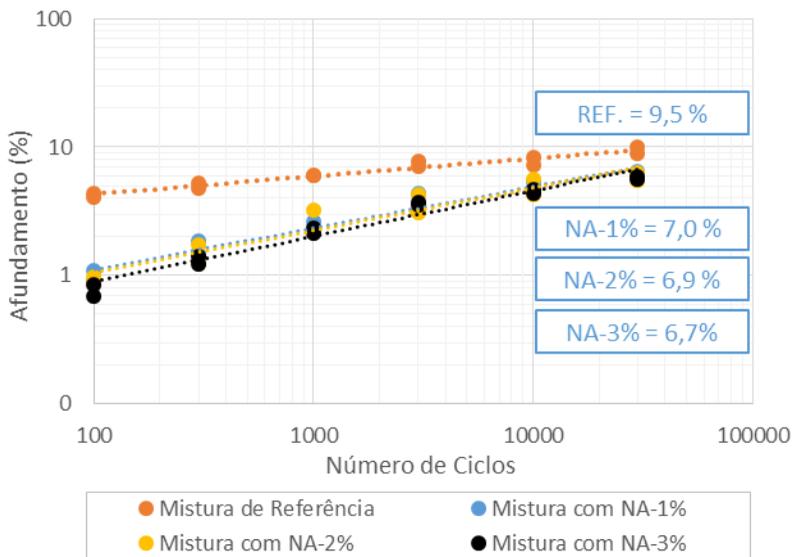
Fonte: Adaptado de Yu *et al.* (2009 *apud* FANG *et al.*, 2013).

No âmbito do Brasil, destaca-se o estudo desenvolvido por Melo (2014). O autor demonstrou que a adição de nanocompósitos (nanotubos de carbono e nanoargila) proporciona às misturas asfálticas um melhor comportamento reológico e desempenho mecânico em relação às misturas convencionais.

A Figura 2.10 apresenta os resultados de deformação permanente realizados por Melo (2014) para misturas convencional e modificadas com diferentes teores de nanoargila. Segundo as especificações

francesas, para este ensaio o limite de afundamento de camadas de concreto asfáltico é de 10%.

Figura 2.10 - Resultados de deformação permanente da mistura convencional e das nanomodificadas com 1, 2 e 3% de nanoargila.

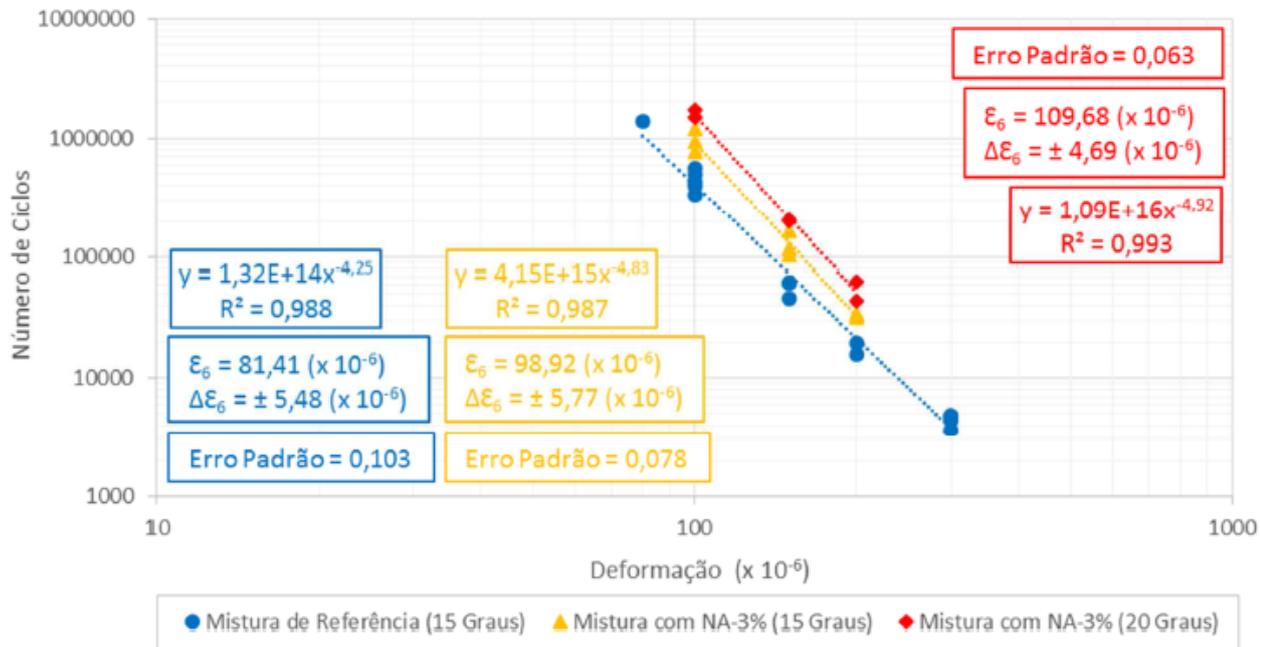


Fonte: Melo (2014).

A Figura 2.11 apresenta as curvas de fadiga de Melo (2014). Em seu estudo, o autor evidenciou que as misturas nanomodificadas apresentaram maior resistência à fadiga em relação à convencional. Os modelos desenvolvidos por Melo (2014) para mistura com ligante convencional (mistura de referência) e para mistura com 3% de nanoargila foram utilizados na simulação numérica desenvolvida neste trabalho, de acordo com o que é exposto nos Capítulos 3 e 4. Detalhes sobre a obtenção das curvas em laboratório são mostrados ainda neste Capítulo 2.

Assim, conhecidos os ligantes convencionais e modificados, é apresentada na sequência uma breve revisão acerca dos agregados que, apesar de não constituírem o foco principal do presente trabalho, dão origem às misturas asfálticas em conjunto com os ligantes.

Figura 2.11 - Curvas de fadiga da mistura convencional e da modificada com 3% de nanoargila.



Fonte: Melo (2014).

2.3 AGREGADOS

2.3.1 Considerações iniciais

Segundo a norma NBR 9935/2005 – Agregados – Terminologia, o termo agregado refere-se a um “material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e de concreto”.

De modo mais simples, por sua vez, o Manual de Pavimentação do DNIT (2006a) menciona o termo “agregado” para definir os materiais pétreos utilizados em pavimentação, genericamente.

Já Bernucci *et al.* (2008) conceituam os agregados como sendo misturas de areais, pedregulhos e rochas minerais, as quais podem ser aplicadas de maneira natural, processada ou artificial.

Nesse sentido, lembrando que os revestimentos asfálticos são constituídos convencionalmente de combinações entre ligantes e agregados, cabe mencionar que os últimos, assim como os primeiros, devem ser capazes de resistir diante das solicitações impostas ao pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

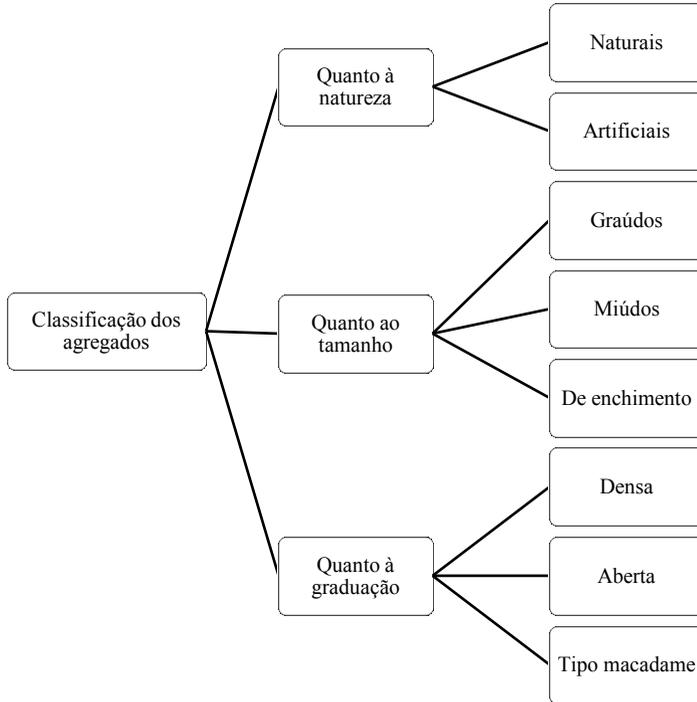
Nesse contexto, é apresentada a seguir uma classificação para os agregados, a qual permite analisar as características potenciais dos mesmos de acordo com determinados aspectos, o que é fundamental para sua escolha quando da definição de um projeto de pavimento.

2.3.2 Classificação

Para o Manual de Pavimentação do DNIT (2006a), os agregados podem ser classificados segundo três aspectos básicos, a serem citados: quanto à natureza, quanto ao tamanho e quanto à graduação. A Figura 2.12 apresenta um esquema da classificação em comento.

Para uma melhor compreensão, cada aspecto da classificação em estudo é analisado separadamente, conforme segue.

Figura 2.12 - Esquema de Classificação dos Agregados.



Fonte: DNIT (2006a).

2.3.2.1 Quanto à natureza

Tomando como critério de classificação a natureza dos agregados, observa-se que o Manual de Pavimentação do DNIT (2006a) os divide em naturais e artificiais.

Nesse caso, o mesmo Manual define os agregados naturais como aqueles provenientes das alterações de rochas devido ao intemperismo ao longo do tempo ou como aqueles oriundos de processos de britagem. São exemplos: pedregulhos, seixos, britas, areias, etc. A Figura 2.13 mostra um exemplo de agregado natural britado, a brita 1 fina.

Figura 2.13 - Brita 1 fina
(Exemplo de agregado natural britado).



Fonte: Grupo Concrevit (2013).

No que diz respeito às rochas que dão origem aos agregados naturais, podem ser citadas as ígneas (formadas a partir da solidificação de massas no interior da Terra ou da solidificação de fluxos de lava – originam agregados com propriedades bastante variáveis), as sedimentares (provenientes do intemperismo e da erosão de rochas já existentes, com posterior transporte, deposição e consolidação de material – são rochas com camadas estratificadas) e, por fim, as metamórficas (oriundas de processos de aquecimento, pressão e atividade química de rochas existentes, resultando em produtos de características muito complexas). Ainda pode ser mencionado um grupo de “rochas” constituído por areias e pedregulhos, material que é depositado após o transporte sofrido por sedimentos de rochas, sem posterior consolidação (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os agregados artificiais, por sua vez, são definidos pelo Manual de Pavimentação do DNIT (2006a) como sendo aqueles formados por grãos oriundos de processos industriais através de transformações físicas e químicas. Como exemplo, tem-se escória de alto forno, argila calcinada e argila expandida. Na Figura 2.14 apresenta-se um exemplo de agregado artificial.

Figura 2.14 - Escória de alto forno
(Exemplo de agregado artificial).



Fonte: CCA Brasil (2010).

Além da subdivisão em agregados naturais e artificiais, Fernandes (2004 *apud* BERNUCCI *et al.*, 2008) ainda considera outra categoria no que diz respeito à natureza dos agregados. Essa categoria consiste no grupo de agregados reciclados, os quais são oriundos da reutilização dos mais diversos materiais. Para o autor, o uso crescente de agregados reciclados se dá devido às restrições da exploração de agregados naturais, além do progresso de métodos para reciclagem de materiais que dão origem a agregados dentro de determinadas especificações.

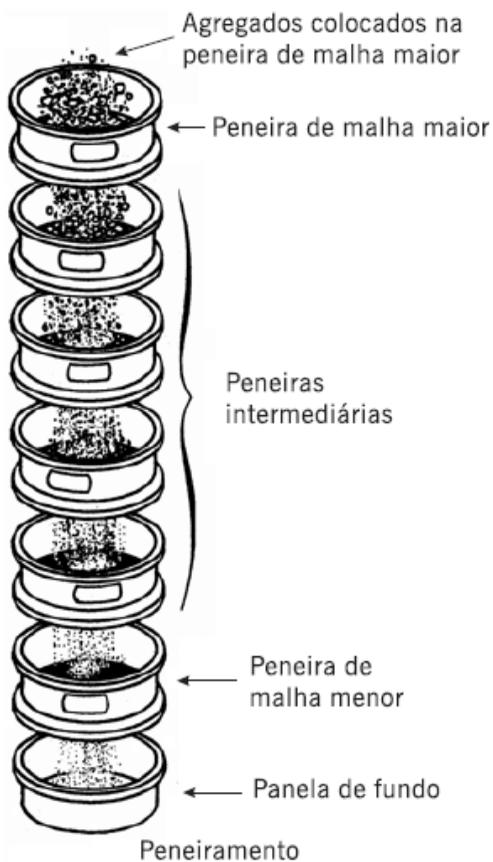
2.3.2.2 Quanto ao tamanho

Essa classificação refere-se diretamente aos tamanhos individuais dos grãos que compõem os agregados.

Para tanto, a separação dos agregados em frações com tamanhos específicos pode ser feita através da aplicação da norma DNER-ME 083/98, que prescreve uma análise de peneiramento dos mesmos.

O procedimento em questão, ilustrado na Figura 2.15, também pode ser aplicado para determinar a graduação dos agregados, conforme disposto no item 2.3.2.3 deste trabalho.

Figura 2.15 - Ilustração de análise por peneiramento.



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

No que diz respeito ao tamanho das peneiras, pode ser utilizado o material especificado na norma DNER-ME 035 (1995). A Tabela 2.3 apresenta as dimensões das peneiras de acordo com essa norma.

Tabela 2.3 - Dimensões nominais das peneiras segundo a norma DNER-ME 035/95.

Dão da Peneira		Abertura da Peneira	
Padrão	Número	Milímetros	Polegadas
75,0mm		75,0	3,0
50,0mm		50,0	2,0
37,5mm		37,5	1,5
25,0mm		25,0	1,0
19,0mm		19,0	0,75
9,5mm		9,5	0,375
4,75mm	4	4,75	0,187
2,36mm	8	2,36	0,0937
2,00mm	10	2,00	0,0789
1,18mm	16	1,18	0,0469
600 μ m	30	0,600	0,0234
425 μ m	40	0,425	0,0168
300 μ m	50	0,300	0,0117
150 μ m	100	0,150	0,0059
75 μ m	200	0,075	0,0029

Fonte: DNER (1995 *apud* BERNUCCI *et al.*, 2008).

De posse dos resultados do peneiramento, agregados graúdos e miúdos, bem como material de enchimento, podem ser classificados da seguinte maneira, de acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006a):

- a) Agregado graúdo é o material retido na peneira n° 4 (4,75mm): britas, cascalhos, seixos, etc.
- b) Agregado miúdo é o material que passa na peneira n° 4 (4,75mm) e fica retido na peneira n° 200 (0,075mm): pó-de-pedra, areia, etc.
- c) Agregado de enchimento ou material de enchimento (filler) é o que passa pelo menos 65% na peneira n° 200 (0,075mm): cal extinta, cimento Portland, pó de chaminé, etc.

Assim, de modo a ilustrar os diferentes tamanhos de grãos utilizados na área da pavimentação, apresenta-se a Figura 2.16.

Figura 2.16 - Diferentes tamanhos de agregados utilizados na pavimentação.



Fonte: PET Engenharia Civil – UFJF (2012).

Conforme se pode observar, as dimensões dos grãos são variáveis. No item referente à caracterização dos materiais é apresentada a distribuição de grãos considerada para este trabalho, assunto que também é tratado no item que segue.

2.3.2.3 Quanto à graduação

De acordo com Vasconcellos (2004):

A granulometria dos agregados é um dos elementos mais importantes de uma mistura asfáltica, visto que ela afeta quase todas as propriedades físicas da mistura.

Assim, justifica-se o interesse em estudar a composição granulométrica dos agregados que constituem as misturas asfálticas, dada sua influência no comportamento futuro dos revestimentos.

Tratando-se da graduação dos agregados, conforme já mostrado, o Manual de Pavimentação DNIT (2006a) os divide em três classes, sendo elas: graduação densa, graduação aberta e agregado tipo macadame.

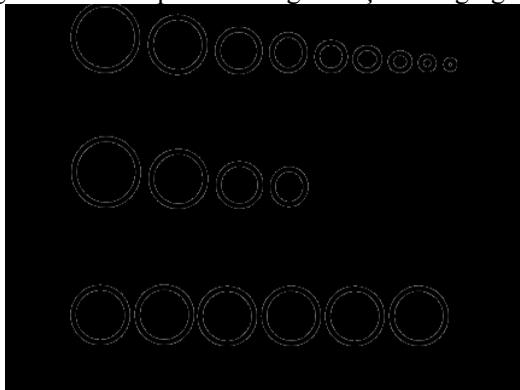
Os agregados de graduação densa são os que originam uma curva granulométrica bem graduada e contínua, havendo material fino em quantidade suficiente de modo a ocupar os espaços vazios entre as partículas de tamanhos maiores (2006a). Um esquema contendo a representação dos tamanhos de grãos que formam uma graduação densa pode ser observado na Figura 2.17-a.

Segundo Vasconcellos (2004), as misturas asfálticas formadas a partir de agregados de graduação densa apresentam um teor de vazios reduzido, em torno de 4%.

Os agregados de graduação aberta, por sua vez, são aqueles que dão origem a uma curva granulométrica bem graduada e contínua, porém apresentando falta de material fino, de modo que os vazios entre as partículas maiores não sejam completamente preenchidos (2006a). Essa combinação de grãos é representada na Figura 2.17-b.

Os agregados do tipo macadame, por fim, consistem em agregados cujas partículas são de um único tamanho, sendo também conhecidos como *one size aggregate* (2006a). Essa graduação encontra-se representada na Figura 2.17-c.

Figura 2.17 - Esquema com graduação de agregados.



Fonte: Elaborada pela autora (2014).

Nesse sentido, em relação à graduação, cabe destacar que o presente trabalho tem como objeto de pesquisa as misturas asfálticas constituídas por agregados de graduação densa, conforme é apresentado em item específico relativo à caracterização dos materiais.

Conhecidos então os materiais constituintes das misturas asfálticas – ligantes e agregados, é apresentada na seqüência uma revisão da literatura a respeito do comportamento das mesmas diante das solicitações oriundas do carregamento correspondente ao tráfego durante a vida útil do pavimento.

2.4 ANÁLISE TENSÃO × DEFORMAÇÃO EM PAVIMENTOS

2.4.1 Comportamento das misturas asfálticas diante das solicitações

Segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006b), a ação dos carregamentos sobre os pavimentos asfálticos dá origem a dois tipos de deformações: as deformações permanentes e as deformações recuperáveis.

As primeiras, nesse sentido, são aquelas que não desaparecem depois da retirada do carregamento. De caráter residual, como são definidas pelo mesmo manual, dão origem às chamadas trilhas de roda (2006b).

Essas deformações, nesse caso, podem ter origem somente na camada de revestimento ou no acúmulo de deformações ao longo das demais camadas do pavimento (FHWA, 1994 *apud* TRICHÊS e FONTES, 2008). A Figura 2.18 ilustra esse tipo de patologia.

As deformações recuperáveis, por outro lado, caracterizam-se por deixarem de existir instantes depois do término do carregamento. O constante arqueamento do pavimento, nesse caso, dá origem ao fenômeno conhecido como fadiga do revestimento (2006b). Esse fenômeno pode ser observado na Figura 2.19.

Nesse sentido, tratando-se de deformações permanentes e recuperáveis, pode-se afirmar que as misturas asfálticas herdaram o comportamento dos ligantes que, conforme já mencionado, comportam-se como materiais viscoelásticos.

Trichês e Fontes (2008) destacam que as deformações que causam a fadiga, bem como as deformações que causam as trilhas de roda, constituem os principais defeitos observados nos pavimentos brasileiros. Isso reforça a necessidade de serem compreendidos seus mecanismos e buscadas melhorias para suas condições.

Figura 2.18 - Deformação permanente em trilha de roda.



Fonte: Moura (2010).

Figura 2.19 - Trincamento devido à fadiga do revestimento.



Fonte: Trichês e Fontes (2007a).

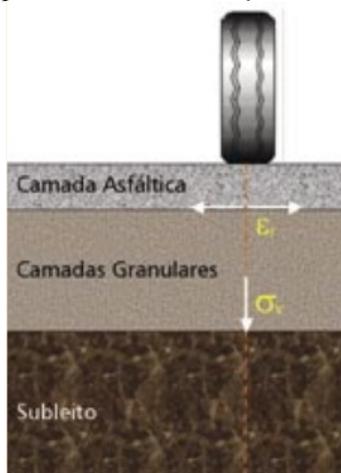
2.4.2 O fenômeno da fadiga

De maneira geral, Trichês e Fontes (2007a) assim definem o fenômeno da fadiga, relacionando-o com o aparecimento de trincas e, em casos mais extremos, com a ruptura completa dos materiais:

Tradicionalmente o fenômeno de fadiga é descrito como um processo de deterioração estrutural que um material sofre quando submetido a um estado de tensões e de extensões repetidas, resultando no aparecimento de fissuras no material que evoluem para trincas ou ruptura completa, após um número suficiente de repetições de carregamento. Ou seja, é a deterioração do material quando solicitado repetidamente por um carregamento.

Com base nesse conceito, os autores explicam o mecanismo de fadiga relacionado à passagem dos eixos sobre uma rodovia através da análise da Figura 2.20. Nota-se a tensão vertical de compressão (σ_v) a qual é submetido o subleito e a deformação de tração (ϵ_r) sofrida pelo revestimento. O fenômeno da fadiga, dessa forma, é resultado das constantes deformações de tração sofridas pelo revestimento asfáltico, e evolui no tempo de acordo com a sequência de carregamentos aplicados.

Figura 2.20 - Esquema de tensões e deformações provocadas na estrutura de um pavimento devido à ação das cargas do tráfego.



Fonte: Trichês e Fontes (2007a).

Considerando que o fenômeno da fadiga consiste em uma das duas principais patologias verificadas nas rodovias brasileiras e, apresentado seu mecanismo, é mostrado a seguir os meios para caracterização da resistência à fadiga das misturas asfálticas em laboratório.

2.4.3 Caracterização da resistência à fadiga das misturas asfálticas

Segundo Bernucci *et al.* (2008), a resistência à fadiga de uma mistura asfáltica pode ser definida de duas formas diferentes: vida de fratura ou vida de serviço. A vida de fratura corresponde ao total de aplicações de carga necessárias para que haja a fratura completa do material, enquanto que a vida de serviço está relacionada com o número de aplicações de carga que causam um decréscimo no desempenho ou na rigidez do material em níveis predeterminados.

Dessa forma, os ensaios de fadiga podem ser realizados à tensão ou a deformação controlada. No primeiro caso, a tensão permanece constante ao longo de toda a realização do ensaio e, no segundo, é a amplitude da deformação que é mantida fixa, resultando num decréscimo de tensões ao longo do tempo (TRICHÊS e FONTES, 2007a).

Trichês e Fontes (2007b) citam os seguintes ensaios como sendo os principais realizados para a definição da vida à fadiga dos revestimentos asfálticos:

- Flexão simples ou alternada em vigas prismáticas simplesmente apoiadas, com carregamento central ou em dois pontos (terço médio central);
- Flexão simples ou alternada com vigas em console (fixa numa extremidade), trapezoidais ou cilíndricas, com carregamento aplicado em uma das extremidades;
- Tração simples em corpos de prova cilíndricos;
- Compressão diametral (tração indireta) em corpos de prova cilíndricos;
- Ensaios de torção em console.

No Laboratório de Pavimentação da UFSC, os ensaios em questão são realizados no aparato de teste quatro pontos, que trabalha à flexão alternada. Esse equipamento também foi utilizado nas pesquisas de Melo (2014) e é apresentado na Figura 2.21.

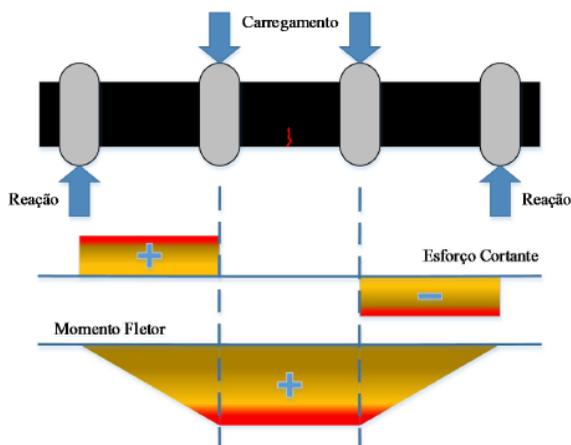
Figura 2.21 - Equipamento de fadiga a quatro pontos.



Fonte: Elaborada pela autora (2014).

O equipamento funciona através da aplicação de duas cargas senoidais posicionadas verticalmente a um terço do vão das vigotas (corpos de prova). Os esforços gerados durante a aplicação das cargas é apresentado na Figura 2.22.

Figura 2.22 - Esquema de esforços internos gerados nos corpos de prova.



Fonte: Melo (2014).

De acordo com a norma AASHTO T 321 (2003), para a realização do ensaio, devem ser moldadas inicialmente placas de grandes dimensões, das quais devem ser serrados corpos de prova prismáticos (vigotas), cujas dimensões devem ser de $380 \pm 6\text{mm}$ de comprimento, $50 \pm 6\text{mm}$ de altura e $63 \pm 6\text{mm}$ de largura.

O ensaio é então conduzido à deformação controlada. Isso significa que as tensões aplicadas ao longo do ensaio são ajustadas para que a deformação permaneça constante.

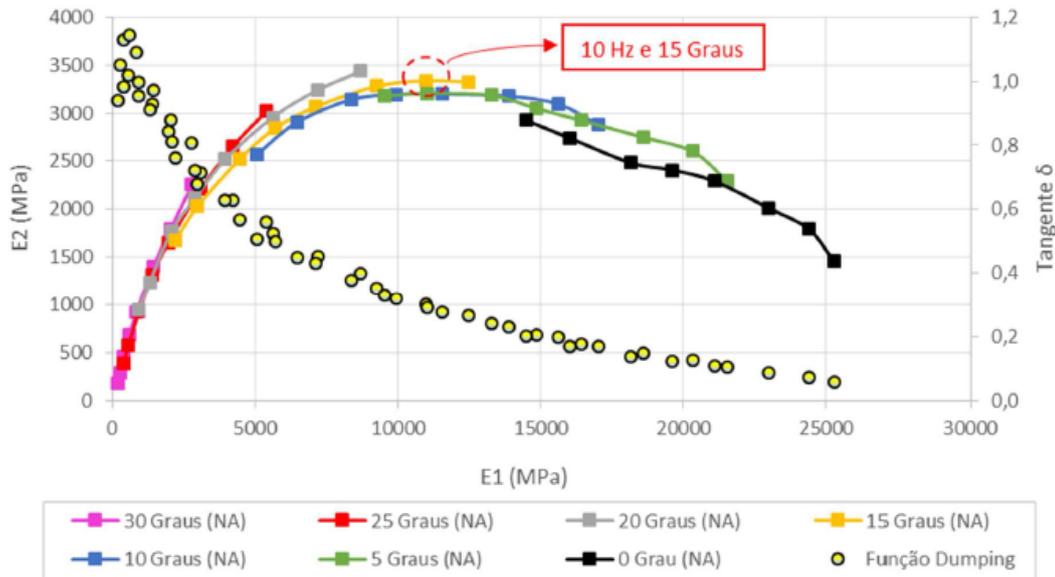
Em relação à frequência dos carregamentos, Chabot *et al.* (2009 *apud* MELO, 2014), afirmam que a velocidade de passagem das cargas de 72 km/h em campo é equivalente à frequência de ensaio de 10 Hz.

Quanto à escolha da temperatura de ensaio, pode ser utilizada a abordagem da energia dissipada. Segundo Diefenderfer (2009 *apud* MELO, 2014), a abordagem da energia dissipada defende que os danos devido à fadiga dos materiais nos ensaios são função da energia dissipada na amostra. Um aumento na dissipação de energia corresponde a um aumento no dano. Nesse caso, tal energia é definida pelo autor como a área correspondente ao *loop* de histerese no gráfico tensão \times deformação a cada carregamento do material. Considerando que o valor da energia dissipada aumenta com o aumento do valor da componente viscosa do módulo complexo (que é explicado na sequência), deve ser buscada uma temperatura para a qual essa componente apresenta o maior valor verificado. Por esse motivo, são realizados previamente os ensaios de módulo complexo a diferentes temperaturas e frequências, os quais permitem obter o plano complexo (Cole-Cole) (Figura 2.23), a partir do qual pode-se definir a temperatura de realização dos ensaios de fadiga.

Definidos os parâmetros de ensaio, conforme o ensaio de fadiga é conduzido, o *software* responsável pelo gerenciamento dos dados do equipamento plota um gráfico nos moldes do gráfico apresentado na Figura 2.24. Pode-se observar que são plotadas duas curvas: (1) n° de ciclos \times módulo complexo; (2) n° de ciclos \times ângulo de fase.

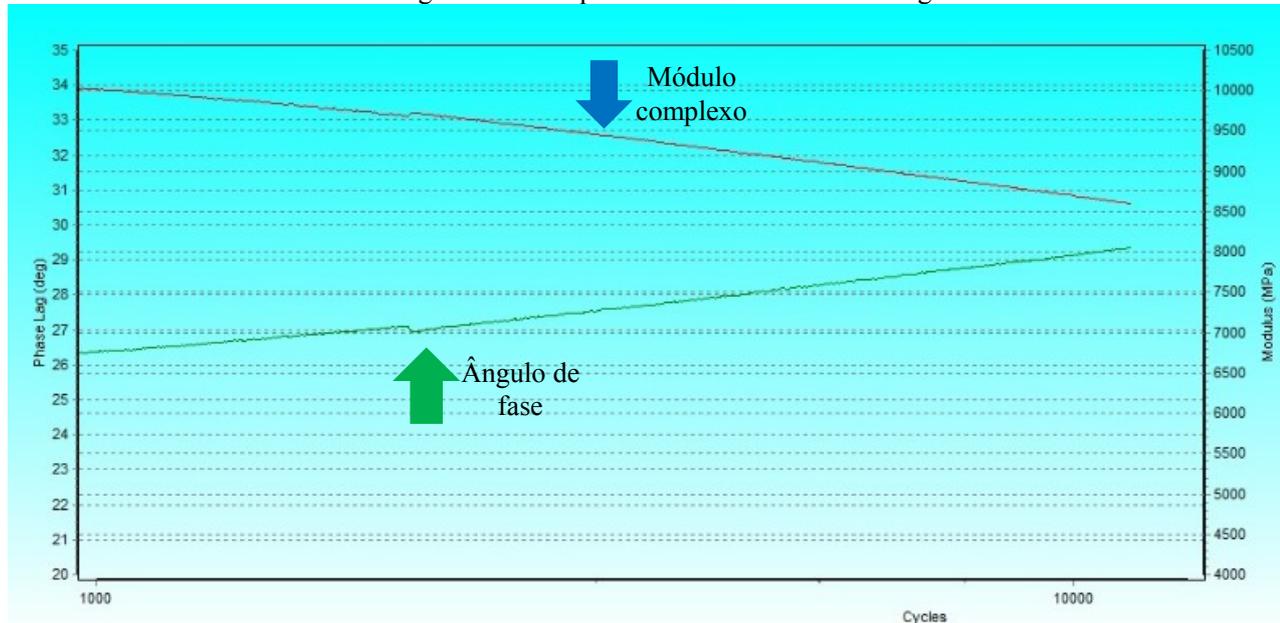
Segundo Ferry (1980 *apud* BERNUCCI *et al.*, 2008), o módulo complexo (E^*) corresponde ao valor absoluto da relação entre a amplitude da tensão complexa aplicada e a amplitude da deformação complexa aplicada no corpo de prova.

Figura 2.23 - Resultados dos ensaios de módulo complexo de Melo (2014) para mistura asfáltica modificada com 3% de nanoargila – plano Cole-Cole.



Fonte: Melo (2014).

Figura 2.24 - Captura de tela do ensaio de fadiga.



Fonte: Elaborada pela autora (2014).

Bernucci *et al.* (2008) explicam que esse valor apresenta duas componentes distintas: uma componente elástica e uma componente viscosa. Esse fenômeno ocorre devido ao comportamento viscoelástico do material asfáltico, como já exposto anteriormente. Para realizar a decomposição, utiliza-se do valor medido para ângulo de fase (δ) que, segundo os autores, corresponde à defasagem verificada entre a tensão solicitante e a deformação sofrida pela mistura. Dessa forma, as equações (1) e (2) correspondem, respectivamente, as parcelas elástica e viscosa do concreto asfáltico:

$$E' = E^* \cos \delta \quad (1)$$

$$E'' = E^* \sin \delta \quad (2)$$

De acordo com Trichês e Fontes (2007a), o critério geralmente estabelecido para a definição da resistência à fadiga de um corpo de prova durante o ensaio de laboratório corresponde à redução de 50% da rigidez inicial do material.

Quanto à fadiga das misturas asfálticas, conforme o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006b), diversos estudos desenvolvidos na área apontaram relações bastante precisas para a caracterização do comportamento à fadiga dos materiais betuminosos, às quais seguem o modelo apresentado na equação (3).

$$N = k \cdot (\varepsilon_t)^{-n} \quad (3)$$

onde:

N = número de repetições devidas ao carregamento até o início do trincamento por fadiga;

ε_t = deformação específica máxima de tração ocorrente na mistura betuminosa sob a ação do carregamento;

k , n = constantes que dependem principalmente da rigidez e do teor de asfalto da mistura betuminosa.

Como se pode observar, as curvas de fadiga de Melo (2014) apresentadas na Figura 2.11 expressam a relação exposta na Equação (3). Os modelos dessas curvas também foram compilados na Tabela 2.3.

Tabela 2.4 - Modelos de fadiga de Melo (2014).

MISTURA	MODELO
Referência (T = 15°C)	$N = 1,32 \times 10^{14} \cdot (\epsilon_t)^{-4,25}$
3% Nanoargila (T = 15°C)	$N = 4,15 \times 10^{15} \cdot (\epsilon_t)^{-4,83}$
3% Nanoargila (T = 20°C)	$N = 1,09 \times 10^{16} \cdot (\epsilon_t)^{-4,92}$

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

Nesse sentido, para o desenvolvimento dos modelos de fadiga de acordo com o que é apresentado na Equação (3) e nos modelos de Melo (2014), é necessária a realização de ensaios a baixos, médios e altos níveis de deformações, de modo que possa ser desenvolvida a curva de fadiga completa.

Esse procedimento foi realizado ao longo do presente trabalho e é descrito em item específico do método de trabalho.

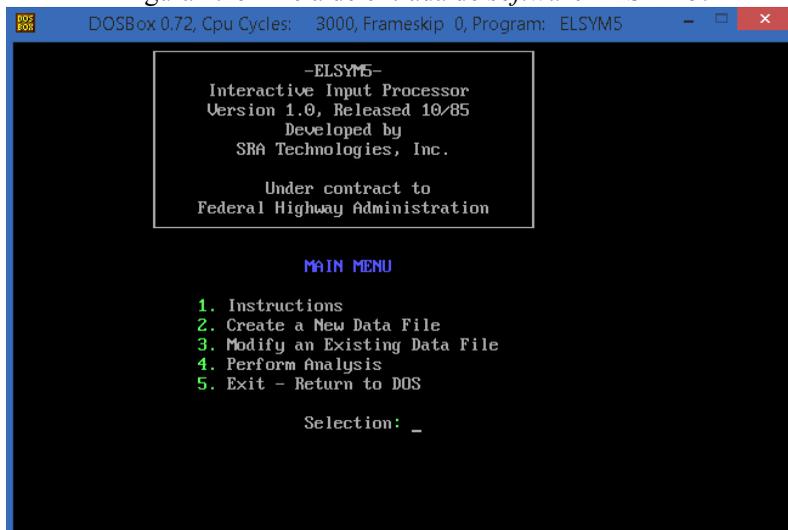
Por ora, será feita uma breve descrição do programa ELSYM5, que foi utilizado para as simulações numéricas desta pesquisa.

2.4.4 ELSYM5

De acordo com Darous (2003), o programa ELSYM5 (*Elastic Layered System*) começou a ser desenvolvido na década de 1970, na Universidade de Berkeley (Califórnia), utilizando-se da linguagem de programação FORTRAN. A Figura 2.25 apresenta a tela de entrada do programa.

De acordo com a Manual de Restauração de Pavimentos do DNIT (2006b), o ELSYM5 possibilita a análise de estruturas de comportamento elástico com até 5 camadas. Para tanto, são solicitados pelo programa como dados de entrada:

- Com relação às cargas: quantidade, valor, coordenadas (x,y) e pressão dos pneus;
- Com relação às camadas e seus materiais constituintes: quantidade, espessuras, Coeficientes de Poisson e Módulos de Elasticidade;
- Com relação aos pontos de análise: coordenadas (x,y) e profundidade z (DAROUS, 2003).

Figura 2.25 - Tela de entrada do *software* ELSYM5.

Fonte: Elaborada pela autora (2014).

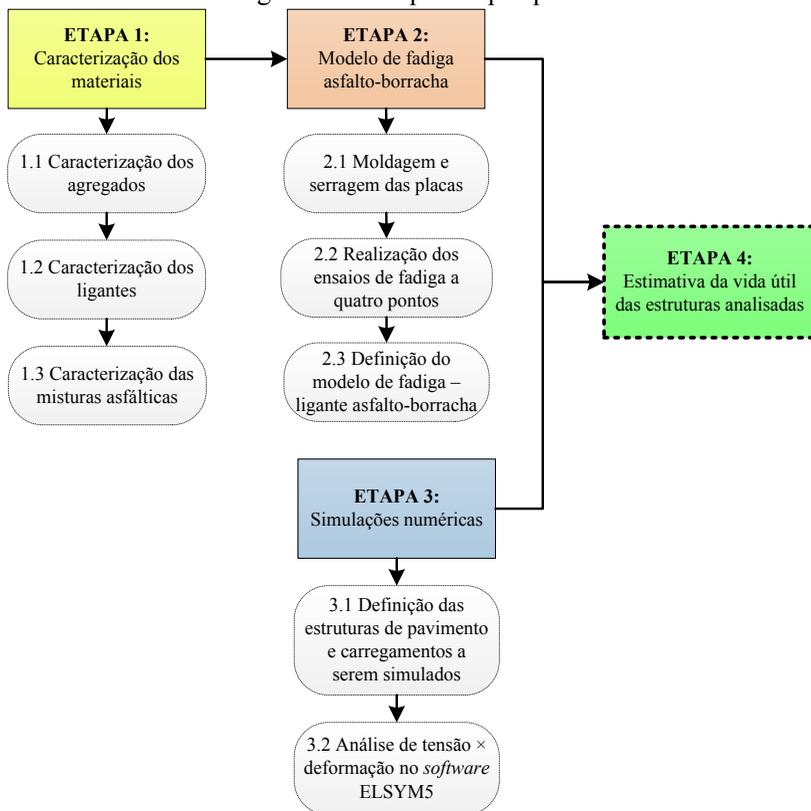
Como dados de saída retornados pelo ELSYM5, Darous (2003) cita: tensões normais, cisalhantes e principais atuantes; deslocamentos normais; deformações normais, cisalhantes e principais.

Dessa forma, de posse dos dados relacionados à estrutura do pavimento, é possível realizar uma estimativa do comportamento das camadas em relação às tensões solicitantes.

CAPÍTULO 3 – MÉTODO DA PESQUISA

De maneira a serem atingidos os objetivos inicialmente propostos neste trabalho, a pesquisa foi desenvolvida em quatro grandes etapas. A Figura 3.1 apresenta as etapas e as correspondentes sub etapas, o que também é descrito nos próximos itens deste trabalho.

Figura 3.1 - Etapas da pesquisa.



Fonte: Elaborada pela autora (2014).

3.1 ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Toda a caracterização referente ao material mencionado e utilizado no presente trabalho foi obtida dos estudos de Trichês (2013) e de Melo (2014).

Nesse sentido, a caracterização dos materiais utilizados na mistura modificada com asfalto-borracha, para a qual foi desenvolvido o modelo de fadiga ao longo da presente pesquisa, foi obtida do relatório técnico de Trichês (2013), cujos resultados correspondem aos ensaios realizados no Laboratório de Pavimentação da UFSC no início do ano de 2013.

Por outro lado, a caracterização dos materiais utilizados por Melo (2014) nos estudos referentes à mistura modificada com nanoargila foi retirada do trabalho do próprio autor.

No que diz respeito à mistura convencional, tanto Trichês (2013) quanto Melo (2014) realizaram experimentos de caracterização.

Assim, a partir das informações obtidas no relatório de Trichês (2013) e no trabalho de Melo (2014), procurou-se inicialmente apresentar as características dos agregados, seguidas pela caracterização dos ligantes e, por fim, das misturas asfálticas.

3.2 ETAPA 2: MODELO DE FADIGA ASFALTO-BORRACHA

3.2.1 Moldagem e serragem de placas com asfalto-borracha

A dosagem da mistura com asfalto-borracha foi realizada no início do ano de 2013, no Laboratório de Pavimentação da UFSC, como parte da Fase I do Projeto de Pesquisa coordenado pela Rede Temática de Tecnologia do Asfalto, patrocinado pela Petrobras. Como resultado, utilizando-se a Metodologia de Dosagem Marshall, obteve-se um teor ótimo de ligante igual a 5,40% (TRICHÊS, 2013).

Assim, para a moldagem das placas a partir das proporções já determinadas em estudo anterior, o material foi primeiramente separado, pesado e mantido em estufa até que fossem estabilizadas as temperaturas de usinagem do ligante e dos agregados.

Após a estabilização das temperaturas, o material foi submetido à homogeneização mecânica.

Na sequência, a mistura foi condicionada em estufa na temperatura de compactação, onde permaneceu por aproximadamente duas horas, simulando o intervalo de tempo correspondente à distância

percorrida pela mistura entre a usina e a obra. Para esse procedimento, foram seguidas as recomendações da norma AASHTO R 30.

Depois disso, foi realizada a moldagem das placas na mesa compactadora LCPC, a qual pode ser observada na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Mesa compactadora LCPC.



Fonte: Elaborada pela autora (2014).

No equipamento foram então moldadas placas de dimensões $60 \times 40 \times 9$ cm, as quais foram serradas nas dimensões necessárias para os ensaios de fadiga no aparato quatro pontos após um período de repouso de 21 dias.

Para a moldagem das placas, foi seguida a norma francesa AFNOR NF P 98-250-2, com compactação forte “tipo 2 bis”, requerida para situações de tráfego pesado.

Após a serragem das placas, foi realizada a verificação das massas específicas dos corpos de prova, de acordo com a norma EN 12697-6.

3.2.2 Realização de ensaios de fadiga a quatro pontos

Conforme já mencionado, os ensaios de fadiga foram realizados no aparato de teste quatro pontos, seguindo-se a norma europeia EM 12697-24.

Os ensaios foram realizados à frequência de 10 Hz, com o objetivo de simular as velocidades de carregamento de 72 km/h.

Quanto à temperatura, foi previamente estabelecida a temperatura de 20°C, visto que Melo (2014) também havia realizado ensaios nessa

temperatura. Nesse sentido, Melo (2014) apontou a temperatura de 15°C como sendo aquela de maior dissipação de energia para as misturas convencional e modificadas com 3% de nanoargila. Porém também apresentou os resultados dos ensaios a 20°C para as misturas nanomodificadas. Assim, serão posteriormente comparados resultados de fadiga a 20°C para mistura com asfalto-borracha e mistura modificada com nanoargila, e resultados de fadiga a 15°C para mistura convencional.

3.2.3 Definição do modelo de fadiga – ligante asfalto-borracha

Com os resultados dos ensaios de fadiga descritos anteriormente, esta sub etapa consiste na plotagem dos resultados (deformação x número de ciclos) e posterior determinação da equação de fadiga do asfalto-borracha a partir dos pontos plotados. Para tanto, foi utilizado o programa Excel.

3.3 ETAPA 3: SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

3.3.1 Definição das estruturas de pavimento e carregamentos a serem simulados

As estruturas de pavimentos simuladas correspondem às estruturas executadas nos segmentos monitorados de Araranguá com misturas convencional e com asfalto-borracha. Além disso, foram analisadas estruturas análogas àquelas executadas em asfalto-borracha, porém considerando o emprego de mistura modificada com nanoargila.

Também foram analisadas duas estruturas além das estruturas de referência executadas em Araranguá, que contemplam pequenas variações nas espessuras das camadas de revestimento. Essas espessuras haviam sido inicialmente projetadas, porém foram alteradas no decorrer da obra, fazendo com que fossem construídos revestimentos menos espessos.

As espessuras das camadas de pavimento foram obtidas no relatório do projeto de pesquisa de Trichês (2013).

Os módulos elásticos das camadas de base, sub-base e subleito foram obtidos da retroanálise realizada por Melo (2014), a partir de levantamentos deflectométricos por FWD realizados em março de 2014.

Valores de coeficientes de Poisson da mistura convencional e nanomodificada também foram adotados conforme Melo (2014), sendo

o coeficiente de Poisson da mistura com asfalto-borracha recomendado por Trichês e Santos (2011).

Quanto aos módulos das camadas de revestimento, optou-se por utilizar os valores de módulo complexo das misturas verificados nos ensaios de laboratório, porém realizando-se um tratamento nos valores para considerar somente as componentes elásticas, dado que o programa ELSYM5 trabalha somente com camadas de comportamento elástico. Nesse sentido, os módulos das misturas convencional e modificada com nanoargila foram obtidos no trabalho de Melo (2014), e o módulo da mistura com asfalto-borracha foi verificado ao longo da parte experimental deste trabalho.

No que diz respeito ao carregamento, adotou-se o carregamento correspondente ao semieixo do eixo padrão de 8,2 toneladas, que significa considerar um carregamento de roda dupla, sendo as rodas distanciadas de 32 cm. Cada roda corresponde, portanto, a uma carga de 2050 kgf, cuja área de contato pneu-pavimento é de cerca de 366 cm² e a pressão de contato é de 5,6 kgf/cm². Melo (2014) considerou a mesma configuração de carregamento nas suas simulações, porém as realizou por meio de um *software* mais sofisticado, o qual levou em conta o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas, a temperatura do pavimento e o fato de os carregamentos no pavimento serem dinâmicos.

3.3.2 Análise de tensão × deformação no programa ELSYM5

De acordo com o carregamento e as estruturas descritas no item anterior, esta etapa consistiu somente na entrada de dados e análise dos dados de saída do ELSYM5, que forneceu, entre outros, os valores de deformação verificados de acordo com a estrutura simulada.

3.4 ETAPA 4: ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS ANALISADAS

Esta etapa foi conduzida aplicando-se os resultados da análise tensão × deformação obtidos com o programa ELSYM5 aos modelos de fadiga referenciados.

Foi possível, então, a realização de uma análise comparativa da estimativa de vida útil das estruturas avaliadas, evidenciando-se a influência de cada mistura asfáltica na previsão da vida útil das estruturas, visto que os materiais empregados nas demais camadas do pavimento foram os mesmos.

CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Agregados

Os agregados utilizados tanto na pesquisa de Melo (2014) quanto no presente trabalho foram obtidos de uma pedreira localizada no município de Sombrio – SC, tratando-se de agregados de origem basáltica.

Melo (2014) efetuou a caracterização dos mesmos, comparando os resultados obtidos com os critérios de aceitação Superpave. Esses dados encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resultado da caracterização dos agregados.

PROPRIEDADES DOS AGREGADOS	RESULTADOS	CRITÉRIOS SUPERPAVE
Massa específica real do agregado graúdo	2,953 g/cm ³	n/a
Massa específica aparente do agregado graúdo	2,880 g/cm ³	n/a
Absorção do agregado graúdo	0,8%	n/a
Massa específica real do agregado miúdo	2,974 g/cm ³	n/a
Massa específica real do agregado pulverulento	2,804 g/cm ³	n/a
Angularidade do agregado graúdo	100%/100%	*100%/100% mín.
Angularidade do agregado miúdo	49,1%	45% mín.
Partículas planas e alongadas	9,6%	10% máx.
Teor de argila (Equivalente de areia)	61,2%	50% mín.
Dureza (Abrasão Los Angeles)	11,6%	35-45% máx.
Sanidade	2,1%	10-20% máx.
Materiais deletérios	0%	0,2-10% máx.

**Ex.: 85%/80% significa que 85% do agregado graúdo têm uma ou mais faces fraturadas e 80% têm duas ou mais faces fraturadas.*

Fonte: Melo (2014).

Conforme é possível observar na Tabela 4.1, todos os resultados verificados na caracterização dos agregados atenderam à especificação Superpave.

O mesmo autor também apresentou em seu estudo as propriedades da cal hidratada (dolomítica) utilizada nas misturas, as quais são mostradas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características físicas e químicas da cal hidratada.

PROPRIEDADES DA CAL HIDRATADA	RESULTADOS
Perda ao fogo	18,6%
Resíduo insolúvel	1,9%
Anidrido carbônico (CO ₂)	2,5%
Óxido de cálcio (CaO)	45,1%
Óxido de magnésio (MgO)	33,5%
Óxidos totais não voláteis (CaO + MgO)	96,5%
Óxidos totais não hidratados	27,6%
Óxidos de CaO não hidratados	0,0%
Cálcio (Ca)	32,2%
Magnésio (Mg)	20,2%
Densidade	3,0 g/cm ³

Fonte: Melo (2014).

Além da apresentação das propriedades físicas e químicas da cal hidratada, Melo (2014) também apresentou os resultados de microscopia eletrônica de varredura dos grãos de cal e pó de pedra, constatando aspectos que conduzem a uma boa ancoragem do ligante.

Assim, com os materiais recém-caracterizados, foi composta a granulometria apresentada na Tabela 4.3.

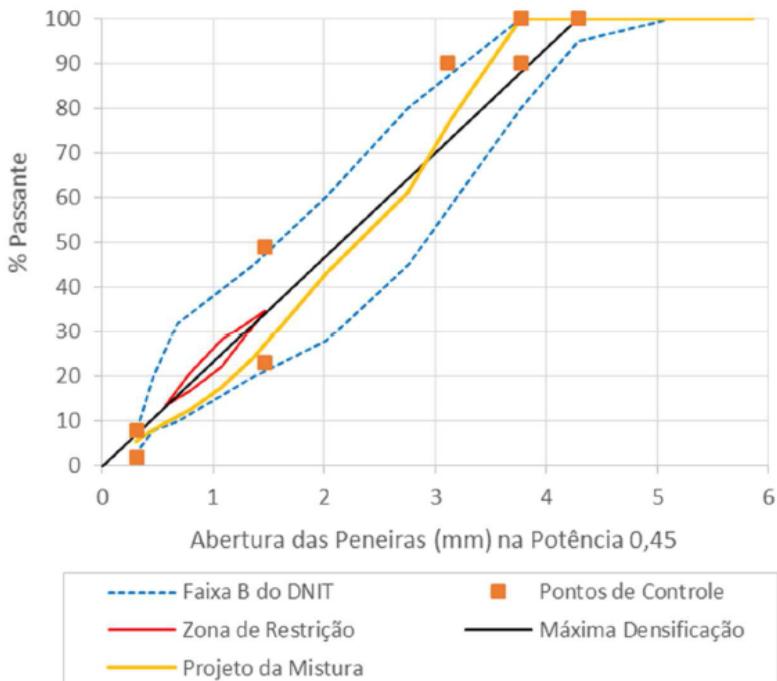
Essa distribuição encontra-se dentro da Faixa IVB do Instituto do Asfalto ou equivalente Faixa B do DNIT. De modo a ilustrar a distribuição, é apresentada a Figura 4.1.

Tabela 4.3 - Distribuição granulométrica dos agregados.

PENEIRA	% PASSANTE
3/4"	100,0
1/2"	77,5
3/8"	61,3
Nº 4	43,3
Nº 10	24,3
Nº 16	17,4
Nº 30	12,6
Nº 50	9,8
Nº 100	7,6
Nº 200	5,4

Fonte: Melo (2014).

Figura 4.1 - Distribuição granulométrica dos agregados.



Fonte: Melo (2014).

4.1.2 Ligantes asfálticos

4.1.2.1 Ligante convencional

O ligante convencional empregado em um dos Segmentos Monitorados de Araranguá foi o CAP 50/70, proveniente da refinaria REPAR de Araucária – PR. Este ligante também foi utilizado nas misturas de referência de Melo (2014).

Os resultados dos ensaios realizados em laboratório, de acordo com os dados disponibilizados por Trichês (2013), são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Características do ligante convencional (DNIT 095/2006 – EM).

CARACTERÍSTICAS	UNID	MÉTODO	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADO
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	NBR 6576	50 - 70	60,5
Ponto de fulgor, mín.	°C	NBR 11341	235	318,5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	NBR 6560	46	-
Viscosidade Saybolt-Furol, 177°C	Ssf	NBR 14950	30-150	38,80

Fonte: Trichês (2013).

Observa-se na Tabela 4.4 que os resultados de todos os ensaios realizados estão de acordo com o que determina a especificação brasileira para cimentos asfálticos de petróleo.

4.1.2.2 Asfalto-borracha

O ligante asfalto-borracha empregado na presente pesquisa foi o CAP modificado por borracha de pneus Ecoflex B (15% de teor de borracha) distribuído pela Greca Asfaltos de Araucária/PR.

Os resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfalto-borracha conduzidos por Trichês (2013) encontram-se na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Características do ligante modificado por borracha (DNIT 111/2009 – EM).

CARACTERÍSTICAS	UNID	MÉTODO	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADO
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	DNER ME 003/99	30 - 70	50
Ponto de amolecimento, mín.	°C	DNER ME 247/94	50	60
Ponto de fulgor, mín.	°C	DNER ME 148/94	235	>240
Recuperação elástica, ductilômetro, 25°C, 10s, mín.	%	NBR 15086	50	-
Viscosidade Brookfield a 175°C, 20 rpm, spindle 3	cP	NBR 15529	800 - 2000	1520

Fonte: Trichês (2013).

Assim como foi observado para o ligante convencional, o asfalto-borracha utilizado na presente pesquisa também atendeu às especificações brasileiras para CAP borracha.

4.1.2.3 Ligante modificado com nanoargila

A modificação do ligante com nanoargila foi feita a partir do ligante convencional CAP 50/70 já apresentado.

A nanomodificação do ligante, nesse sentido, foi realizada por Melo (2014) em um equipamento conhecido como misturador mecânico de alto cisalhamento.

Melo (2014) realizou modificações com 1, 2 e 3% de incorporação em relação ao peso de ligante. Para o presente estudo, no entanto, optou-se por considerar somente os resultados de Melo (2014) para ligante nanomodificado com 3% de nanoargila.

Segundo o autor, a nanoargila modificada foi obtida da Laviosa Chimica Mineraria S.p.A., apresentando o nome comercial de Dellite 67G.

Melo (2014) destacou em seu trabalho as seguintes características do nanomaterial: tamanho da partícula (seca) de 7-9 μ m, tamanho da partícula após a dispersão no ligante de 1x500nm e densidade de 1,7g/cm³.

De acordo com o autor, a nanoargila utilizada em sua pesquisa é composta, em ordem decrescente de porcentagem, por carbono, silício, alumínio, ferro, cloro, titânio, potássio e estrôncio.

Algumas características do ligante nanomodificado no estado virgem são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Características do ligante modificado por 3% de nanoargila.

CARACTERÍSTICAS	UNID	RESULTADO
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	55
Ponto de amolecimento	°C	50,2
Índice de susceptibilidade térmica (IST)	-	-0,92

Fonte: Melo (2014).

Ao longo de sua pesquisa, Melo (2014) evidenciou que a nanomodificação do ligante com nanoargila faz com que haja uma redução nos valores medidos para penetração. O ponto de amolecimento, por outro lado, é aumentado. Em termos de

susceptibilidade térmica, o autor verificou em seu estudo uma diminuição dos valores calculados.

4.1.3 Misturas asfálticas

4.1.3.1 Mistura convencional

No ano de 2013, de acordo com o relatório técnico de Trichês (2013), foi conduzida no CENPES (Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello – Petrobras) a dosagem da mistura convencional a ser empregada em um dos Segmentos Monitorados do Contorno de Araranguá. A metodologia de dosagem correspondeu à Metodologia Superpave, apontando um teor ótimo de ligante igual a 4,15%.

Melo (2014), por outro lado, também realizou a dosagem da mistura convencional através da Metodologia Superpave, apontando, contudo, um teor ótimo de ligante correspondente a 4,35%. As propriedades volumétricas determinadas pelo autor para a mistura convencional com 4,35% de ligante encontram-se na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Propriedades volumétricas dos corpos de prova da mistura convencional.

PROPRIEDADE	RESULTADO	CRITÉRIO SUPERPAVE
Gmm (g/cm ³)	2,685	n/a
Vv (%)	4,01	4,0%
VAM (%)	14,12	13,00 mín.
RBV (%)	71,57	65-75
RFB	1,37	0,8-1,6*

** Para granulometrias que passam abaixo da zona de restrição da metodologia Superpave.*

Fonte: Melo (2014).

4.1.3.2 Mistura modificada com asfalto-borracha

Segundo relatório técnico de Trichês (2013), a dosagem da mistura com asfalto-borracha empregada em um dos Segmentos Monitorados do contorno de Araranguá foi realizada através da Metodologia Marshall, no Laboratório de Pavimentação da UFSC. A opção por conduzir a dosagem pela Metodologia Marshall ocorreu devido a não ter havido tempo hábil de se operacionalizar o

compactador giratório adquirido pela UFSC naquela fase do projeto financiado pela Petrobras.

Os resultados da dosagem, nesse caso, apontaram para um teor ótimo de ligante igual a 5,40%. Os resultados da determinação das características correspondentes à mistura com asfalto-borracha encontram-se apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Características dos corpos de prova da mistura com ligante asfalto-borracha.

CARACTERÍSTICAS DA MISTURA ASFÁLTICA		RESULTADOS
Densidade teórica	g/cm ³	2,662
Densidade aparente	g/cm ³	2,565
Teor ótimo	%	5,40
Vazios	%	3,8
VAM	%	17,6
RBV	%	78,0
Fluência	Mm	3,2
Estabilidade	Kgf	1535
Equivalente de areia	%	67,2
Temperatura de trabalho do ligante	°C	170-177
Temperatura de trabalho da mistura	°C	155-165

Fonte: Trichês (2013).

4.1.3.3 Mistura modificada com nanoargila

A dosagem da mistura modificada com 3% de nanoargila foi conduzida por Melo (2014), utilizando-se da metodologia de dosagem Superpave. Os resultados da dosagem realizada pelo autor apontaram para um teor ótimo de ligante igual a 4,10%.

Nesse caso, a Tabela 4.9 apresenta as propriedades volumétricas determinadas por Melo (2014) para os corpos de prova moldados com ligante modificado com 3% de nanoargila e teor de ligante igual a 4,10%.

Tabela 4.9 - Propriedades volumétricas dos corpos de prova da mistura modificada com nanoargila.

PROPRIEDADE	RESULTADO	CRITÉRIO SUPERPAVE
Gmm (g/cm ³)	2,690	n/a
V _v (%)	4,00	4,0%
VAM (%)	13,73	13,00 mín.
RBV (%)	70,84	65-75
RFB	1,39	0,8-1,6*

** Para granulometrias que passam abaixo da zona de restrição da metodologia Superpave.*

Fonte: Melo (2014).

Apesar de ter determinado o teor ótimo de ligante igual a 4,10%, Melo (2014) conduziu posteriormente os ensaios de desempenho das misturas utilizando-se de um teor de ligante igual a 4,35%, que corresponde ao teor ótimo verificado para a mistura convencional. O autor adotou esse procedimento para assegurar a mesma proporcionalidade entre agregados e ligante da mistura convencional e nanomodificada e, dessa forma, evitar que os resultados dos ensaios de desempenho fossem influenciados pelo teor de ligante.

4.2 MODELO DE FADIGA ASFALTO-BORRACHA

De acordo com o método apresentado no item 3.2.1, para os ensaios de fadiga em laboratório, foram moldadas duas placas de dimensões 60 x 40 x 9cm. Para cada uma das placas foi necessário um total de aproximadamente 55kg de material, que foi previamente separado e pesado. A separação dos agregados é ilustrada na Figura 4.2.

Separado o material e condicionado em estufa, foi realizada a homogeneização das misturas mecanicamente, conforme se pode observar na Figura 4.3.

Novamente o material foi conduzido à estufa em temperatura de compactação, onde permaneceu por um período de aproximadamente duas horas.

Figura 4.2 - Separação e pesagem dos agregados para ensaios de fadiga.



Fonte: Elaborada pela autora (2014).

Figura 4.3 - Homogeneização mecânica das misturas.



Fonte: Elaborada pela autora (2014).

Depois disso, foram moldadas as placas na mesa compactadora LCPC, conforme apresentado no método da pesquisa.

As placas moldadas passaram por um período de repouso de 21 dias, sendo posteriormente serradas, resultando em 10 vigotas com dimensões de aproximadamente 380 mm de comprimento, 50mm de altura e 63mm de largura. Destes corpos de prova, foi possível aproveitar 9 para o ensaio de fadiga. A Figura 4.4 apresenta parte das vigotas serradas.

Figura 4.4 - Vigotas para ensaio de fadiga.



Fonte: Elaborada pela autora (2014).

Com as 9 vigotas devidamente serradas e identificadas, foram realizados os ensaios de fadiga no aparato de teste quatro pontos, a temperatura de 20°C e frequência de 10 Hz.

Além disso, foram variadas as amplitudes de deformação nos diferentes ensaios entre 174 e 415 $\mu\epsilon$.

Dos ensaios foram então obtidos valores de deformação, valores de módulo complexo, ângulo de fase e, por fim, número de ciclos necessários para reduzir o módulo inicial da mistura em 50%. A Tabela 4.10 mostra os dados compilados dos ensaios de fadiga.

Tabela 4.10 - Dados compilados dos ensaios de fadiga (20°C, 10 Hz).

CP	DEFORMAÇÃO ε ($\times 10^{-6}$)	MÓDULO COMPLEXO INICIAL E^* (kgf/cm ²)	ÂNGULO DE FASE INICIAL δ (°)	Nº DE CICLOS
1	331	49160	35,2	19725
2	309	44570	37,5	31958
3	255	57740	34,0	100780
4	174	64040	29,6	1165915
5	225	57620	33,4	318901
6	183	62410	31,6	1016251
7	415	45890	36,6	25158
8	277	55320	34,0	56510
9	203	69210	32,7	200391

Fonte: Elaborada pela autora (2014).

A partir dos dados obtidos nos ensaios de fadiga (Tabela 4.10), foram plotados em um gráfico os 9 pontos referentes aos valores correspondentes aos 9 corpos de prova ensaiados.

Através de uma análise de regressão foi possível modelar os resultados obtidos, obtendo-se o modelo da curva de fadiga da mistura com asfalto-borracha. O modelo é apresentado na Equação (4).

$$N = 1,31 \times 10^{17} \cdot (\varepsilon_t)^{-5,00} \quad (4)$$

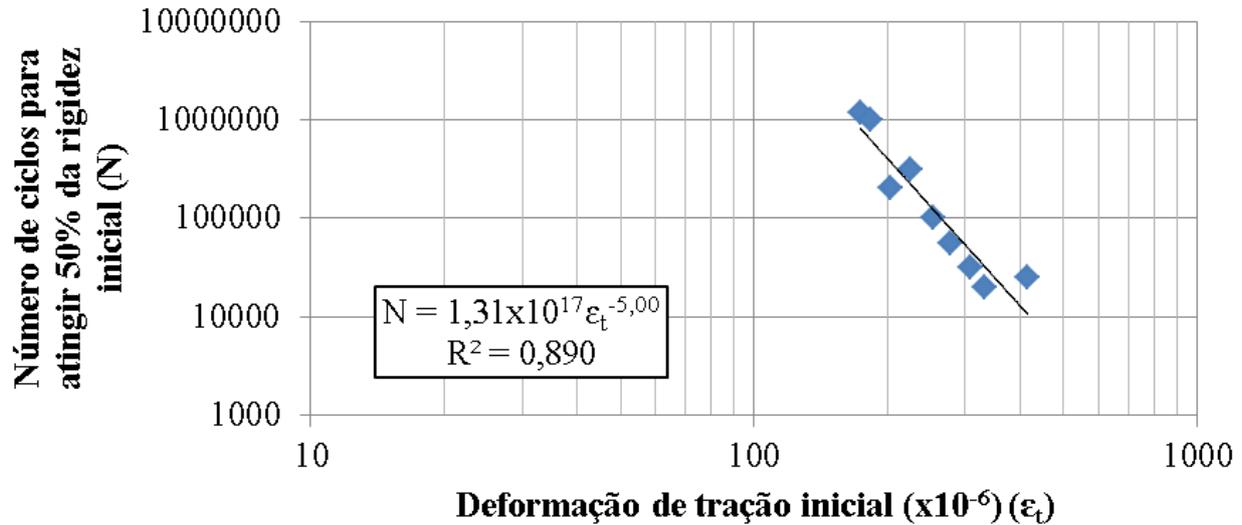
onde:

N = número de repetições até a falha por fadiga;

ε_t = deformação específica máxima de tração.

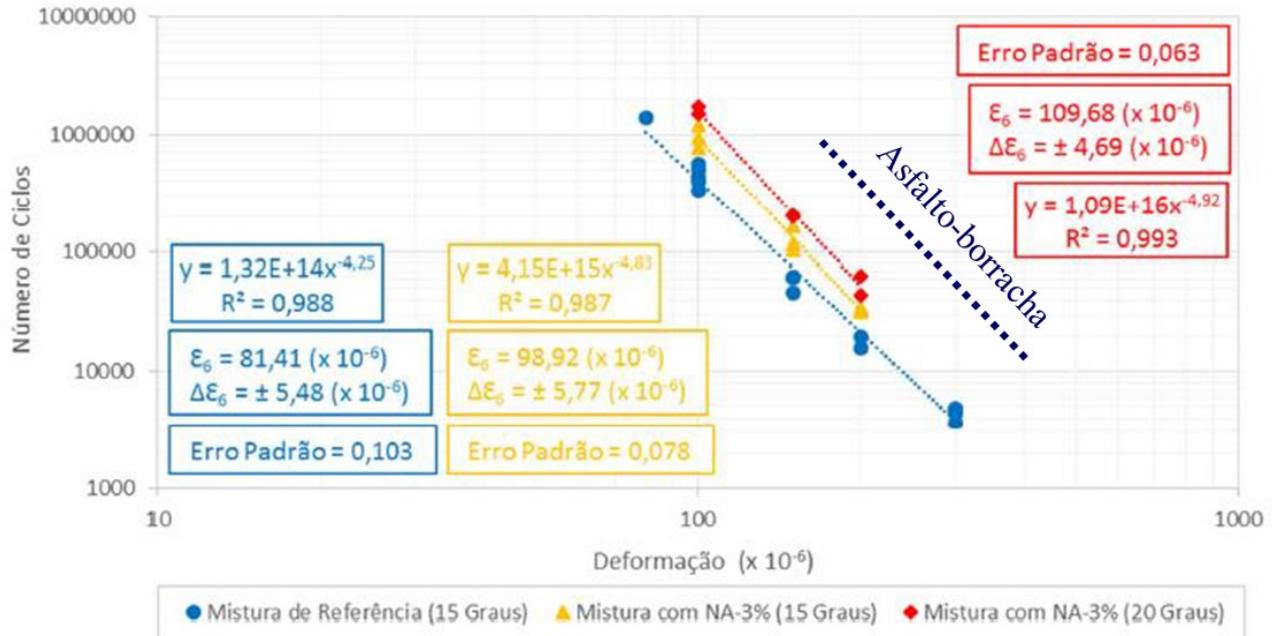
A curva de fadiga correspondente é apresentada na Figura 4.5. Também são apresentadas na Figura 4.6 as curvas de fadiga de Melo (2014) para misturas com ligante convencional e ligante nanomodificado em conjunto com a curva de fadiga obtida neste trabalho para a mistura com asfalto-borracha.

Figura 4.5 - Curva de fadiga asfalto-borracha.



Fonte: Elaborada pela autora (2014).

Figura 4.6 - Curvas de fadiga ligante convencional (15°C, 10 Hz), nanomodificado (15°C e 20°C, 10 Hz) e asfalto-borracha (20°C, 10 Hz).



Fonte: Adaptado de Melo (2014).

4.3 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Conforme descrito no item 3.3.1, os valores referentes aos módulos elásticos e dos coeficientes de Poisson das camadas de base, sub-base e subleito das estruturas foram obtidos do trabalho de Melo (2014). Os mesmos são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Dados das camadas de base, sub-base e subleito do pavimento simulado.

CAMADA	MÓDULO ELÁSTICO E (kgf/cm³)	COEFICIENTE DE POISSON v
Base	2600	0,35
Sub-base	2100	0,35
Subleito	1800	0,35

Fonte: Melo (2014).

Os valores das componentes elásticas do módulo complexo e coeficiente de Poisson das misturas convencional e modificada com nanoargila também foram retirados de Melo (2014) e são apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Dados das misturas convencional e com nanoargila.

MISTURA	COMPONENTE ELÁSTICA E' (kgf/cm³)	COEFICIENTE DE POISSON v
Convencional (15°C)	94535	0,30
Modificada com 3% de nanoargila (20°C)	71898	0,30

Fonte: Melo (2014).

Para a obtenção do valor da componente elástica do módulo complexo da mistura com asfalto-borracha, realizou-se inicialmente o tratamento dos valores de módulo complexo obtidos nos ensaios de fadiga. A partir da Equação (1), foram calculadas as componentes elásticas e, na sequência, realizou-se a média entre elas. O resultado desse procedimento pode ser observado na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Cálculo da média das componentes elásticas dos módulos complexos – mistura com asfalto-borracha.

CP	MÓDULO COMPLEXO INICIAL E* (kgf/cm ²)	ÂNGULO DE FASE INICIAL δ (°)	COMPONENTE ELÁSTICA E' (kgf/cm ²)
1	49160	35,2	40171
2	44570	37,5	35360
3	57740	34,0	47869
4	64040	29,6	55682
5	57620	33,4	48104
6	62410	31,6	53156
7	45890	36,6	36841
8	55320	34,0	45862
9	69210	32,7	58241
MÉDIA			46810

Fonte: Elaborada pela autora (2014).

Adotou-se então como módulo do asfalto-borracha para efeito de simulações o valor de 46810 kgf/cm², com coeficiente de Poisson igual a 0,27, este último recomendado por Trichês e Santos (2011) para asfalto-borracha.

Em relação às estruturas simuladas (espessuras, materiais, módulos elásticos e coeficientes de Poisson), foi montada a Tabela 4.14, que reúne todos os dados de entrada das simulações realizadas no ELSYM5 obtidos através do método descrito anteriormente.

A Figura 4.7 ilustra as estruturas analisadas, bem como as profundidades onde foram obtidas as deformações no programa ELSYM5.

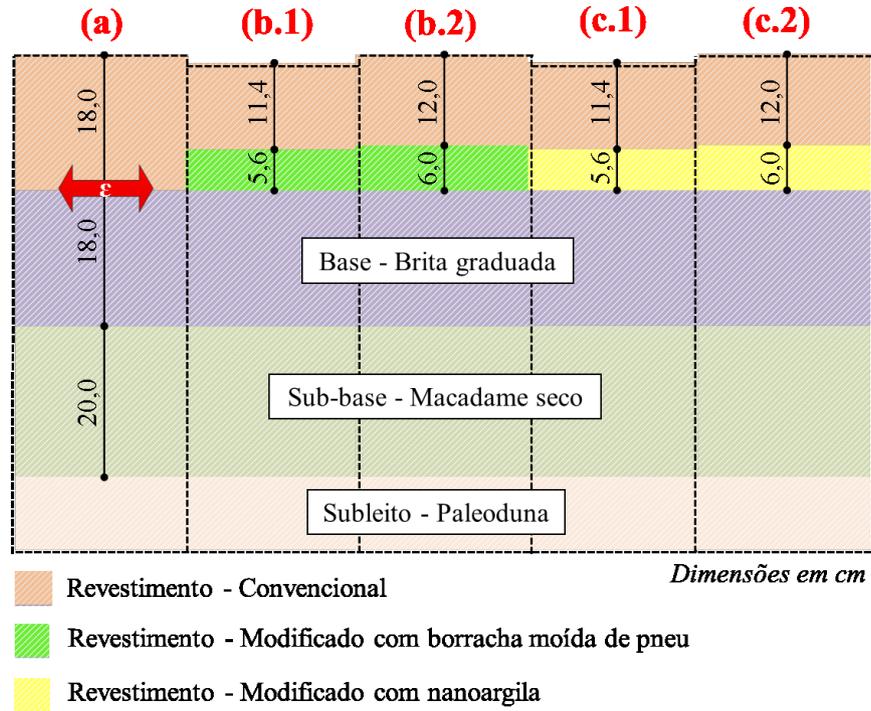
Na sequência, a Figura 4.8 apresenta a configuração do carregamento a ser considerado, de acordo com o que já havia sido mencionado no item 3.3.1.

Tabela 4.14 - Dados das estruturas para simulação numérica.

ESTRUTURA	CAMADAS	MATERIAL	ESPESSURA (cm)	E (kgf/cm²)	N
(a)	Revestimento	Convencional	18,0	94535 (15°C)	0,30
	Base	Brita graduada	18,0	2600	0,35
	Sub-base	Macadame seco	20,0	2100	0,35
	Subleito	Paleoduna	-	1800	0,35
(b.1)	Revestimento 1	Convencional	11,4	94535 (15°C)	0,30
	Revestimento 2	Asfalto-borracha	5,6	46810 (20°C)	0,27
	Base	Brita graduada	18,0	2600	0,35
	Sub-base	Macadame seco	20,0	2100	0,35
	Subleito	Paleoduna	-	1800	0,35
(b.2)	Revestimento 1	Convencional	12,0	94535 (15°C)	0,30
	Revestimento 2	Asfalto-borracha	6,0	46810 (20°C)	0,27
	Base	Brita graduada	18,0	2600	0,35
	Sub-base	Macadame seco	20,0	2100	0,35
	Subleito	Paleoduna	-	1800	0,35
(c.1)	Revestimento 1	Convencional	11,4	94535 (15°C)	0,30
	Revestimento 2	Nanomodificado	5,6	71898 (20°C)	0,30
	Base	Brita graduada	18,0	2600	0,35
	Sub-base	Macadame seco	20,0	2100	0,35
	Subleito	Paleoduna	-	1800	0,35
(c.2)	Revestimento 1	Convencional	12,0	94535 (15°C)	0,30
	Revestimento 2	Nanomodificado	6,0	71898 (20°C)	0,30
	Base	Brita graduada	18,0	2600	0,35
	Sub-base	Macadame seco	20,0	2100	0,35
	Subleito	Paleoduna	-	1800	0,35

Fonte: Elaborada pela autora (2014), com dados de Trichês (2013), Melo (2014) e do presente trabalho.

Figura 4.7 - Estruturas para simulação numérica.



Fonte: Elaborada pela autora (2014).

A Tabela 4.15 apresenta os resultados obtidos para as deformações na extremidade inferior do revestimento asfáltico das cinco estruturas analisadas.

Tabela 4.15 - Resultados de deformação ELSYM5.

ESTRUTURA	DESCRIÇÃO	ϵ ($\times 10^{-6}$)
(a)	Revestimento de 18cm com ligante convencional	69
(b.1)	Revestimento de 11,4cm com ligante convencional e 5,6cm com asfalto-borracha	100
(b.2)	Revestimento de 12,0cm com ligante convencional e 6,0cm com asfalto-borracha	93
(c.1)	Revestimento de 11,4cm com ligante convencional e 5,6cm com ligante nanomodificado	84
(c.2)	Revestimento de 12,0cm com ligante convencional e 6,0cm com ligante nanomodificado	78

Fonte: Elaborada pela autora (2014).

A título de verificação, foram obtidas também as deformações nas extremidades inferiores do revestimento convencional das estruturas (b.1) e (c.1) – na profundidade de 11,4 cm, obtendo-se, respectivamente 46 e 33 $\mu\epsilon$.

A mesma análise foi realizada para as estruturas (b.2) e (c.2), porém na profundidade de 12,0 cm, obtendo-se 43 $\mu\epsilon$ para a estrutura (b.2) e 31 $\mu\epsilon$ para a estrutura (c.2).

Observa-se, na Tabela 4.15, que a deformação mais expressiva foi verificada na extremidade inferior do revestimento da estrutura (b.1), em que a camada de revestimento é composta por ligante convencional e asfalto-borracha, na espessura real executada no Segmento Monitorado de Araranguá (totalizando 17 cm de revestimento).

Tanto as estruturas analisadas para asfalto-borracha quanto para ligante nanomodificado apresentam maiores deformações em relação à deformação sofrida na estrutura em que é utilizado somente ligante convencional. Isso ocorre porque o módulo da mistura asfáltica

convencional ($94535 \text{ kgf/cm}^3 - 15^\circ\text{C}$) é maior que o das misturas com ligante modificado com nanoargila ($71898 \text{ kgf/cm}^3 - 20^\circ\text{C}$) e com ligante asfalto-borracha ($46810 \text{ kgf/cm}^3 - 20^\circ\text{C}$).

4.4 ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS ANALISADAS

A partir dos dados obtidos das simulações numéricas e dos modelos desenvolvidos por Melo (2014) para ligante convencional e ligante modificado com nanoargila, e do modelo desenvolvido neste estudo para asfalto-borracha, estimou-se a vida à fadiga de cada estrutura avaliada. Essa estimativa foi realizada em termos de número de solicitações equivalentes ao eixo padrão de 8,2 toneladas, admitindo-se uma correspondência desses resultados com a metodologia da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) e considerando-se um fator campo-laboratório igual a 1.

A Tabela 4.16 apresenta, assim, um resumo dos resultados obtidos ao longo do presente trabalho. A Figura 4.9 ilustra comparativamente a estimativa da vida útil das estruturas avaliadas.

Em relação à verificação realizada na extremidade inferior do revestimento convencional para as estruturas (b.1) e (c.1) – na profundidade de 11,4 cm, foram obtidas estimativas de vida útil correspondentes a $N_{8,2t} = 1,13 \times 10^7$ e $N_{8,2t} = 4,64 \times 10^7$, respectivamente para a estrutura com asfalto-borracha e com nanoargila. Observa-se que a vida útil obtida para o revestimento convencional da estrutura (b.1) ($N_{8,2t} = 1,13 \times 10^7$) é menor que a vida útil obtida para o revestimento com asfalto-borracha ($N_{8,2t} = 1,31 \times 10^7$) da mesma estrutura (aproximadamente 15%). Entretanto, pela proximidade dos resultados, admitiu-se que as trincas ocorrerão simultaneamente, adotando-se a vida útil à fadiga do asfalto-borracha para a estrutura como um todo.

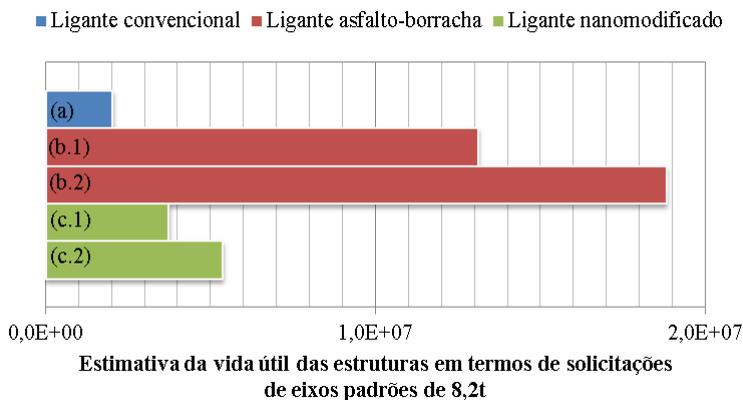
A análise análoga realizada para as estruturas (b.2) e (c.2) – por ora na profundidade de 12,0 cm, conduziu a um resultado de vida útil em termos de fadiga do revestimento convencional igual a $N_{8,2t} = 1,51 \times 10^7$ para a estrutura (b.2) e $N_{8,2t} = 6,06 \times 10^7$ para a estrutura (c.2). No caso da estrutura com asfalto-borracha, pode ser apresentada a mesma observação feita anteriormente para a estrutura (b.1), em que a vida útil do revestimento convencional é menor que a vida útil do revestimento modificado, correspondendo a uma diferença de cerca de 25%. Nesse caso, também admitiu-se que as trincas ocorrerão de maneira simultânea.

Tabela 4.16 - Resumo dos resultados de vida à fadiga.

ESTRUTURA	DESCRIÇÃO	$\mu\epsilon$	MODELO	$N_{8,2t}$ - vida útil do pavimento
(a)	Revestimento de 18cm com ligante convencional	69	$N = 1,32 \times 10^{14} (\mu\epsilon_t)^{-4,25}$ (MELO, 2014)	$2,02 \times 10^6$
(b.1)	Revestimento de 11,4cm com ligante convencional e 5,6cm com asfalto-borracha	100	$N = 1,31 \times 10^{17} (\mu\epsilon_t)^{-5,00}$	$1,31 \times 10^7$
(b.2)	Revestimento de 12,0cm com ligante convencional e 6,0cm com asfalto-borracha	93	$N = 1,31 \times 10^{17} (\mu\epsilon_t)^{-5,00}$	$1,88 \times 10^7$
(c.1)	Revestimento de 11,4cm com ligante convencional e 5,6cm com ligante nanomodificado	84	$N = 1,09 \times 10^{16} (\mu\epsilon_t)^{-4,92}$ (MELO, 2014)	$3,72 \times 10^6$
(c.2)	Revestimento de 12,0cm com ligante convencional e 6,0cm com ligante nanomodificado	78	$N = 1,09 \times 10^{16} (\mu\epsilon_t)^{-4,92}$ (MELO, 2014)	$5,35 \times 10^6$

Fonte: Elaborada pela autora (2014).

Figura 4.9 - Ilustração dos resultados de vida à fadiga.



Fonte: Elaborada pela autora (2014).

Assim, a análise das estruturas (a) e (b.1) demonstra que, em campo, o Segmento Monitorado de Araranguá em que o revestimento foi executado parcialmente com asfalto-borracha provavelmente apresentará uma vida útil cerca de 5,5 vezes maior que o Segmento executado somente com ligante convencional.

Por outro lado, a execução de um segmento com estrutura análoga à estrutura da simulação (b.1), porém com parte da camada de revestimento modificada com 3% de nanoargila – estrutura (c.1) – corresponderia a praticamente o dobro de vida útil em relação ao trecho com ligante convencional.

Comparando-se, por sua vez, as estruturas (a) e (b.2), que apresentam a mesma espessura total de revestimento – 18 cm, observa-se que, se executado com os 18 cm inicialmente previstos em projeto, o Segmento Monitorado de estrutura (b.2) apresentaria uma vida útil aproximadamente 8,3 vezes maior em comparação ao Segmento executado exclusivamente com mistura convencional.

Enquanto isso, a execução da estrutura (c.2), com revestimento de 18 cm e parte da espessura modificada com nanoargila, corresponderia a um aumento de 1,6 vezes na vida útil da estrutura em termos de fadiga quando comparada à estrutura (a).

Assim, a técnica de incorporação de nanoargila aos ligantes mostrou-se bastante positiva, mesmo quando somente uma parte da camada de revestimento é substituída por mistura nanomodificada. De maneira geral, pretende-se destacar a partir da análise aqui desenvolvida o ganho da vida útil do revestimento convencional quando da substituição de uma parcela de sua espessura por revestimento nanomodificado, o que pode significar grandes melhorias para o setor rodoviário brasileiro.

Contudo, tratando-se da comparação do desempenho à fadiga do revestimento modificado com borracha e do revestimento modificado com nanoargila (estruturas (b.1) e (c.1)), percebe-se que, se a segunda estrutura tivesse sido executado em campo, a primeira ainda apresentaria uma vida útil cerca de 2,5 vezes maior.

Por fim, se aumentadas as espessuras totais dos revestimentos das estruturas (b.1) e (c.1) de 17 cm para 18 cm (estruturas (b.2) e (c.2) – espessura original de projeto para o trecho em asfalto-borracha), pode-se perceber um aumento de aproximadamente 45% na vida à fadiga do revestimento. Isso significa que a mudança na espessura original do projeto para o trecho em asfalto-borracha executado em Araranguá provavelmente acarretará em um grande prejuízo para sua vida útil em relação ao trincamento por fadiga. Nesse sentido, observa-se a

importância do controle de qualidade do processo executivo de um pavimento, haja vista que pequenas variações nas espessuras das camadas podem dar origem a grandes diferenças no comportamento da estrutura ao longo de sua vida útil.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De acordo com os objetivos inicialmente propostos, em linhas gerais, o presente trabalho permitiu uma comparação da vida à fadiga de misturas asfálticas convencionais, modificadas com borracha moída de pneu e modificadas com nanoargila.

A realização deste estudo foi possível a partir do desenvolvimento de um modelo de fadiga para mistura com asfalto-borracha e da aplicação de modelos de fadiga já estudados para mistura convencional e mistura modificada com nanoargila.

Como resultado principal, em termos de vida à fadiga, constatou-se através das simulações realizadas uma melhora considerável no desempenho dos revestimentos convencionais quando parte da sua espessura foi substituída por revestimentos nanomodificados.

Sendo assim, a incorporação de nanoargila às misturas asfálticas pode significar grandes contribuições ao cenário rodoviário do País, podendo representar, de acordo com as análises realizadas no presente trabalho, entre o dobro e o triplo da vida útil dos revestimentos em termos de trincamento por fadiga.

Entretanto, no contexto abordado, ainda se observou um melhor desempenho dos revestimentos com asfalto-borracha quando comparados aos revestimentos nanomodificados.

Por esse motivo, destaca-se aqui a positividade dos resultados obtidos ao longo desta pesquisa no âmbito ambiental, dado que os ligantes modificados com borracha constituem-se em um destino adequado para os pneus descartados.

Além disso, pôde ser verificada neste trabalho a influência de pequenas variações na espessura dos revestimentos em estruturas de pavimento. Como resultado, observou-se uma grande queda da vida útil das estruturas quando simulados pequenos decréscimos na espessura dos revestimentos.

Nesse sentido, salienta-se a importância do controle tecnológico de execução das camadas de pavimento, o que constitui uma tarefa essencial para assegurar a qualidade da estrutura executada.

Apesar dos resultados benéficos obtidos para a resistência à fadiga das misturas com asfalto-borracha e com ligante modificado com nanoargila, ressalta-se que a vida à fadiga não deve ser analisada isoladamente quando do projeto do revestimento de um pavimento, visto que a fadiga não consiste na única patologia identificada nas rodovias brasileiras.

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com os resultados obtidos no presente estudo, recomendam-se os seguintes trabalhos futuros:

- Realização de análises comparativas complementares, abrangendo, por exemplo, o desempenho à deformação permanente das três misturas avaliadas;
- Condução de análises de viabilidade econômica contemplando o custo/benefício oriundo da utilização dos diferentes materiais aqui estudados (tais análises consistem, atualmente, em uma tarefa difícil, dado que ainda não existem equipamentos para nanomodificação de ligantes em grandes quantidades e os mesmos ainda não são oferecidos comercialmente);
- Realização de estudos com ligantes duplamente modificados, isto é, testes que contemplem a adição de nanomateriais em ligantes modificados com borracha (com isso, espera-se que as características benéficas de ambos os materiais sejam associadas para produzir misturas de desempenho notável).

REFERÊNCIAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation. **AASHTO T 321: Standard method of test determining the fatigue life of compacted hot-mix asphalt (HMA) subjected to repeated flexural bending.** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2003.

_____. **AASHTO R 30: Standard practice for mixture conditioning of hot-mix asphalt (HMA).** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2010.

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

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS. **Produção da Indústria Brasileira de Pneus em 2013.** Disponível em: <http://www.anip.com.br/?cont=conteudo&area=32&titulo_pagina=Produ%E7%E3o>. Acesso em: 29 out 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEL. **Resolução ANP N° 19, DE 11.7.2005 DOU 17.7.2005.**

_____. **Resolução ANP N° 39, DE 24.12.2008 DOU 26.12.2008.**

ARTE VEJA SÃO PAULO. **Infográfico sobre as camadas do asfalto.** 2013. Disponível em: <<http://vejasp.abril.com.br/materia/buraco-buraqueira-grafite>>. Acesso em: 09 mai 2014.

ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt Industry Glossary of Terms.** Disponível em: <<http://www.asphaltinstitute.org/dotAsset/c5b13a5f-85d7-47ca-976e-fb417ef7eb9a.pdf>>. Acesso em: 08 mai 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7207: Terminologia e Classificação de Pavimentação.** Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 9935: Agregados – Terminologia.** Rio de Janeiro, 2005.

BARTHOLOMEU, Daniela Bacchi. **Quantificação dos impactos econômicos e ambientais decorrentes do estado de conservação das rodovias brasileiras.** Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2006.

BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

CCA BRASIL. 2010. Disponível em: <http://www.ccabrasil.org.br/Coproducto_Coprodutos.asp>. Acesso em: 17 mai 2014.

DAROUS, João. **Estudo comparativo entre sistemas de cálculo de tensões e deformações utilizados em dimensionamento de pavimentos asfálticos novos.** Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

DNER. Departamento Nacional De Estradas De Rodagem. **DNER ME 083: Agregados – Análise Granulométrica.** Rio de Janeiro, 1998.

_____. **DNER ME 035: Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 1995.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Pavimentação.** 3. Ed. – Rio de Janeiro, 2006a.

_____. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos.** 2. Ed – Rio de Janeiro, 2006b.

_____. **Norma DNIT 031/2006 – ES Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço.** Rio de Janeiro, 2006c.

_____. **Norma DNIT 095/2006 – EM Cimentos asfálticos de petróleo – Especificação de material.** Rio de Janeiro, 2006d.

_____. **Norma DNIT 111/2009 – EM Pavimentação Flexível – Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de Material.** Rio de Janeiro, 2006e.

EN – European Standard. **EN 12697-24: Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt, part 24: Resistance to fatigue.** CEN, Brussels. 2004.

_____. **EN 12697-6: Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt, part 6: Determination of bulk density of bituminous specimen.** CEN, Brussels. 2004.

FANG, Changqing *et al.* Nanomaterials Applied in Asphalt Modification: A Review. **Journal Of Materials Science & Technology**, v. 29, n. 7, p.589-594, 2013.

FAXINA, Adalberto Leandro. **Estuda da viabilidade técnica do uso de resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha.** Tese (Doutorado) – Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

FONTES, Liseane Padilha Thives da Luz. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos.** Tese (Doutorado) – Universidade do Minho / Universidade Federal de Santa Catarina. Portugal, 2009.

GRAJALES, Luis Enrique Sanabria. Nanotecnologia aplicada a pavimentos flexíveis. **Asfalto em Revista**, Rio de Janeiro, p.6-8, jan/fev 2011. Entrevista concedida a Tatiana Fontenelle.

GRUPO CONCREVIT. **Brita 1 fina.** 2013. Disponível em: <<http://www.concrevit.com.br/pages/italia/produ/Produtos/brita1fina.htm>>. Acesso em: 17 mai 2014.

MARIANO, Jacqueline Barboza. **Impactos Ambientais do Refino de Petróleo.** Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2001.

MELO, João Victor Staub de. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

MELO, João Victor Staub de; TRICHÊS, Glicério. **Nanomodificação da superfície de *pavers* para a purificação do ar em meio urbano**. 2010. Trabalho apresentado ao 6º Seminário Nacional – Modernas Técnicas Rodoviárias, Florianópolis, 2010.

MEMÓRIA PETROBRAS. **Torre da Refinaria de Paulínia**. 2010. Disponível em: <http://memoria.petrobras.com.br/acervo/torre-da-refinaria-de-paulinia#.VFWpU_nF8j0>. Acesso em: 09 mai 2014.

MORILHA JUNIOR, Armando. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

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

PAMPLONA, Thais Ferreira. **Efeito da adição de ácido polifosfórico em ligantes asfálticos de diferentes fontes**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2013.

PEREIRA, Paulo António Alves; FREITAS, Elisabete Fraga de; NASCIMENTO, José Heriberto O. Nanotecnologia: Saiba mais sobre o seu uso na funcionalização de materiais asfálticos. **Asfalto em Revista**, Rio de Janeiro, p.22-25, mai/jun 2011.

PET ENGENHARIA CIVIL – UFJF. 2012. Disponível em: <<http://blogdopetcivil.com/2012/06/27/producao-de-agregados-para-a-construcao-civil/>>. Acesso em: 18 mai 2014.

TRICHÊS, Glicério. **Desenvolvimento de Método para Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos. Fase I: Trechos experimentais e Materiais de Pavimentação: UFSC: Informações do segmento de Araranguá/SC.** Florianópolis, 2013.

TRICHÊS, Glicério; FONTES, Liseane P. T. da Luz. Deformação Permanente em Misturas Asfálticas. **Fatos & Asfaltos**, Araucária, p.3-5, n. 14, jun 2008.

_____. Fadiga dos Revestimentos. **Fatos & Asfaltos**, Araucária, p.4-5, n. 10, jun 2007a.

_____. Fadiga dos Revestimentos. **Fatos & Asfaltos**, Araucária, p.4-5, n. 11, set 2007b.

TRICHÊS, Glicério; SANTOS, Antônio dos. **Avaliação do Desempenho da Reciclagem do Pavimento da Rodovia SC 301.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE RODOVIAS E CONCESSÕES, 7., 2011, Foz do Iguaçu.

TUCHUMANTEL JUNIOR, Osvaldo. Asfalto Natural: Um modificador com propriedades benéficas para o pavimento. **Asfalto em Revista**, Rio de Janeiro, p.8-10, mar/abr 2011.

VASCONCELOS, Kamilla Lima. **Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas A Quente dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com diferentes granulometrias.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2004.

YANG, Jun; TIGHE; Susan. A review of advances of Nanotechnology in asphalt mixtures. **Journal Of Materials Science & Technology**, v. 96, n. 6, p.1269-1276, 2013.