



FAEX - FACULDADE DE EXTREMA

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

HUGO ANDRÉ FLORÊNCIO

**ANÁLISE DA FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM LIGANTE
CONVENCIONAL E MODIFICADO ATRAVÉS DO ENSAIO DE
FLEXÃO EM 4 PONTOS**

Extrema

2018

HUGO ANDRÉ FLORÊNCIO

**ANÁLISE DA FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM LIGANTE
CONVENCIONAL E MODIFICADO ATRAVÉS DO ENSAIO DE
FLEXÃO EM 4 PONTOS**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia civil da Faculdade de Extrema como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel sob orientação da Prof. Me. Luana Bernadete Dariva.

Extrema

2018

HUGO ANDRÉ FLORÊNCIO

**ANÁLISE DA FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM LIGANTE
CONVENCIONAL E MODIFICADO ATRAVÉS DO ENSAIO DE
FLEXÃO EM 4 PONTOS**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil Da Faculdade de Extrema como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Orientador: Prof. Me. Luana Bernardete Dariva.

Data de aprovação: ____/____/____

Banca Examinadora:

Prof. Me. Luana Bernardete Dariva

Orientador

Faculdade de Ciências Sociais Aplicadas de Extrema

Prof.

Faculdade de Ciências Sociais Aplicadas de Extrema

Prof.

Faculdade de Ciências Sociais Aplicadas de Extrema

“No meio da dificuldade encontra-se à oportunidade”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Essencialmente a Deus, autor do meu destino, por conceder-me a oportunidade de estudar, dar paciência e força para concluir a graduação.

Agradeço a minha esposa Marcia pela paciência, força e incentivo a realizar todas as etapas da graduação.

Agradeço meus filhos Vitória e Murilo, que apesar de não entenderem muito tudo o que se passou, permaneceram ao meu lado em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais pelo amor, incentivo e apoio absoluto.

A minha orientadora Luana pelo suporte, por suas correções e pelos seus incentivos.

Agradeço também aos meus avós que já se partiram mas que sem dúvidas também foram fonte dessa inspiração.

Agradeço também meus irmãos que me incentivaram sempre que foi necessário nessa jornada.

Não poderia deixar de agradecer aos meus companheiros de trabalho Thiago e Miguel pela oportunidade e meu maior incentivador em toda essa trajetória José Mario.

Aos companheiros de sala de aula, pela companhia e parceria durante todos esses anos, e aos professores, pelos conhecimentos adquiridos que os mesmos nos passaram, a fim de nos orientar, ensinar e melhorar a vida profissional que teremos.

“Dedico este trabalho aos meus familiares que sempre me apoiaram e auxiliaram a alcançar esta conquista”.

RESUMO

O sistema de transporte do Brasil é essencialmente realizado pelas rodovias, e a cada ano esse volume de solicitações aumenta, com isso, tem-se ações de cargas cada vez mais intensas, que tem acarretado aos pavimentos um acelerado processo de degradação no qual o uso de técnicas de reabilitação empregando materiais convencionais não mais alcançam um desempenho mecânico adequado da estrutura. O presente trabalho tem o objetivo de contribuir para o estudo de misturas betuminosas onde se avaliou a vida de fadiga de uma mistura asfáltica, tendo como diferença os tipos de ligantes empregados, com foco de se obter uma vida de fadiga maior do pavimento em relação as misturas comumente utilizadas na infraestrutura de transporte brasileira. As misturas foram produzidas em laboratório na qual buscou-se avaliar as propriedades e o desempenho mecânico destas misturas, otimizando uma mistura com a melhor capacidade estrutural. Os resultados demonstraram que, a mistura com ligante modificado apresentou-se vantajosa em relação à mistura convencional, produzida com betume convencional, em termos de desempenho elástico e acréscimo da resistência à fadiga.

Palavras-chave: Pavimento Asfáltico, Vida de Fadiga, Transporte, Asfalto.

ABSTRACT

The transportation system in Brazil is essentially carried out by highways, and each year this volume of requests increases, with the result that more and more intense wheel loadings have been carried out, which has led to the pavements to an accelerated process of degradation in the use of rehabilitation techniques employing conventional materials no longer achieves an adequate mechanical behavior of the structure. The present work has the objective of contributing to the study of bituminous mixtures in which the fatigue life of an asphalt mixture was evaluated, having as a difference the types of binders used, with a focus on obtaining a longer fatigue life of the pavement in relation to the pavements. mixtures commonly used in the Brazilian transport infrastructure. The mixtures were produced in a laboratory where the properties and the mechanical performance of these mixtures were evaluated, optimizing a mixture with the best structural capacity. The results showed that the blend with modified binder was advantageous over the conventional blend, produced with conventional bitumen, in terms of elastic behavior and increased fatigue strength.

Keywords: *Asphalt Pavement, Fatigue Life, Transportation, Asphalt.*

SUMARIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVO	13
1.2	Objetivos Específicos	13
1.3	Justificativa	14
1.4	Metodologia da Pesquisa	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Pavimento	15
2.2	Efeitos da Ação do Tráfego	17
2.3	Dosagem de Revestimento Asfáltico	19
2.3.1	Definição das Massas Específicas	20
2.4	Fadiga em Pavimentos Asfálticos	25
2.5	Tipos de Ensaios de Fadiga em Laboratório	28
2.5.1	Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral	30
2.5.2	Ensaio de Fadiga à Flexão em Corpos de Prova Trapezoidais	31
2.5.3	Ensaio de Fadiga à Flexão em Viga Apoiada em Quatro Pontos	32
2.6	Agregados Graúdos e Miúdos	36
2.7	Ligante Asfáltico	38
2.8	Tipos de Ligantes Asfálticos de Petróleo	39
2.8.1	Asfalto Modificado	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1	Agregados Graúdos e Miúdos	44
3.1.1	Características Físicas e Mecânicas dos Agregados	45
3.2	Composição Granulométrica	46
3.3	Preparação e Moldagem dos Corpos de Prova	47
3.4	Fabricação dos Corpos de Prova Prismáticos para Ensaio de Fadiga	50
4	RESULTADOS	55
4.1	Misturas Asfálticas pelo Método Marshall	55
4.1.1	Mistura Asfáltica com Ligante Convencional 30/45	55
4.1.2	Mistura Asfáltica com Ligante Modificado com Polímero 60/85	59
4.2	Ensaios de Fadiga a Flexão em 4 pontos	62
4.2.1	Fadiga com Ligante Convencional 30/45	63
4.2.2	Fadiga com Ligante Modificado 60/85	64
4.2.3	Resumo dos Ensaios de Fadiga	65
4.3	Comparativo dos custos	66
5	CONCLUSÃO	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas do Pavimento Rodoviário.....	16
Figura 2 – Distribuição dos Esforços em Pavimento Rígido e Flexível	17
Figura 3 – Solicitação Sofrida pelo Pavimento	18
Figura 4 - Representação das Componentes de uma Mistura Asfáltica.....	20
Figura 5 – Representação Ensaio Rice Test.....	21
Figura 6 – Massas consideradas para <i>DMTm</i>	22
Figura 7 – Representação volumétrica para determinação da <i>DMTm</i>	22
Figura 8 – Ilustração de uma Mistura Asfáltica.....	23
Figura 9 – Representação Esquemática dos Corpos de Prova.....	23
Figura 10 - Estágios que ocorrem em um processo de fadiga	27
Figura 11 – Tipos de Ensaios de Fadiga.....	29
Figura 12 – Configuração do Ensaio de Fadiga à Compressão Diametral.....	30
Figura 13 – Configuração do Ensaio de Fadiga em Amostras Trapezoidais.....	32
Figura 14 – Configuração do ensaio de fadiga a flexão 4 pontos.....	33
Figura 15 – Características do Equipamento de Fadiga	34
Figura 16 - Torre de Destilação Fracionada.....	39
Figura 17 – Lago Natural Trinidad e Tobago.....	39
Figura 18 – Moldagem da capsula para ensaio.....	40
Figura 19 - Penetrômetro para determinação da penetração do ligante asfáltico	40
Figura 20 - Ductilômetro.....	42
Figura 21 – Homogeneização mecânica	44
Figura 22 – Homogeneização mecânica.....	44
Figura 23 – Coleta com o auxílio da pá.....	45
Figura 24 – Detalhe do local da coleta	45
Figura 25 – Agregados fracionados	48
Figura 26 -Detalhe do agregado fracionado.....	48
Figura 27 - Pesagem de cada corpo de prova	48
Figura 28 – Corpos de prova pesados e prontos para mistura.....	48
Figura 29 – Adição do ligante asfáltico para mistura.....	49
Figura 30 – Detalhe da mistura homogeneizada.....	49
Figura 31 - Compactação Marshall	49

Figura 32 - Ensaio Rice Teste	49
Figura 33 - Determinação da massa específica aparente	50
Figura 34 - Agregados fracionados	51
Figura 35 – Pesagem dos agregados para composição da placa.....	51
Figura 36 – Adição do ligante asfáltico.....	51
Figura 37 - Misturadora	51
Figura 38 – Início do processo	52
Figura 39 – Processamento da mistura.....	52
Figura 40 – Mistura asfáltica homogeneizada	52
Figura 41 – Mistura asfáltica sendo despejada na bandeja	52
Figura 42 – Mistura asfáltica na forma de compactação	53
Figura 43 – Compactação através de rolagem.....	53
Figura 44 -Detalhe de demarcação para corte	53
Figura 45 – Detalhe da demarcação para corte	53
Figura 46 – Corte com serra circular	54
Figura 47 – Corte com serra circular	54
Figura 48 – Vigotas para preparadas para ensaio	54
Figura 49 – Preparação para do equipamento para ensaio	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos mínimos	34
Tabela 2 Faixas Granulométricas DNIT	37
Tabela 3 - Classificação dos Ligantes Convencionais	41
Tabela 4 - Classificação dos Ligantes Modificados.....	43
Tabela 5: Caracterização dos agregados graúdos.....	45
Tabela 6 – Composição granulométrica para enquadramento na faixa C do DNIT. .	46
Tabela 7 – Energia de compactação, tempo de condicionamento e temperatura.....	55
Tabela 8 – Parâmetros volumétricos e resistências	56
Tabela 9 – Parâmetros de projeto	59
Tabela 10 - Energia de compactação, tempo de condicionamento e temperatura....	59
Tabela 11 - Parâmetros volumétricos e resistências.....	59
Tabela 12 - Parâmetros de projeto.....	62
Tabela 13 Resumo dos ensaios de fadiga	63
Tabela 14 – Resumo dos ensaios de fadiga	64
Tabela 15 – Comparativo direto entre a vida de fadiga	65
Tabela 16 – Estimativa de Custo com ligante 30/45	67
Tabela 17 – Estimativa de custo com ligante 60/85	67
Tabela 18 – Diferença em percentual entre os tipos de ligante utilizados.....	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Situação do pavimento nacional.....	14
Gráfico 2 – Granulometria Individual dos materiais.....	46
Gráfico 3 – Composição granulométrica	47
Gráfico 4 - Definição da massa específica aparente (Mea).....	56
Gráfico 5 - Volume de vazios	57
Gráfico 6 - Vazios do agregado mineral.....	57
Gráfico 7 - Vazios cheio de betume	58
Gráfico 8 – Resistência a tração indireta.....	58
Gráfico 9 - Definição da massa específica aparente (Mea).....	60
Gráfico 10 - Volume de vazios	60
Gráfico 11 - Vazios do agregado mineral	61
Gráfico 12 - Vazios cheio de betume	61
Gráfico 13 - Resistência a tração indireta	62
Gráfico 14 - Gráfico resumo com ligante convencional.....	64
Gráfico 15 – Gráfico resumo com ligante modificado.....	65
Gráfico 16 – Comparativo entre a vida de fadiga com as duas soluções.....	66

ABREVIATURAS

AASTHO - American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANP - Agencia Nacional Petróleo

ASTM - American Society for Testing and Materials

CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo

CDT - Centro de Desenvolvimento Tecnológico

CNT - Confederação Nacional dos Transportes

CP - Corpos de Prova

DC - Deformação Controlada

DMT_m - Densidade Máxima Teórica Medida

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

EN - Especificação Nacional

ES - Especificação de serviço

EUA - Estados Unidos da América

Hz - Hertz

IBP - Instituto Brasileiro de Petróleo

kN - Kilo Newton

LVDT - Linear Variable Transducer

Ma - Massa Especifica do Asfalto

MAQ - Mistura Asfáltica a Quente

Mea - Massa Especifica Aparente

MG - Minas Gerais

MPa - Mega Pascal

MR - Módulo de Resiliência

Ms - Massa Seca

M_{sub} - Massa Submersa

N - Newton

NBR - Norma Brasileira

NF – Norma Francesa

PA – Ponto de Amolecimento

PN - Penetração

RBV - Relação Vazios Betume

RE – Recuperação Elástica

RT - Resistencia a Tração

SBS - Styrene Butadiene Copolymer

SHRP - Strategic Highway Research Program

SNV - Sistema Nacional Viário

VAM - Volume nos Agregados Minerais

VCB - Vazios Cheios de Betume

VV - Volume de Vazios

SIMBOLOS

% - Porcentagem

%a - Porcentagem de asfalto

A - Peso da Amostra

a - Distância entre o centro e os fixadores em metros – 0,1185 m

B - Calibração do frasco + água a 25° C

b - Largura média do corpo de prova

C - Calibração do frasco + amostra + água

f - Frequência de carregamento

h - Altura média do corpo de prova

L - Comprimento entre os grampos externos em metros – 0,3555 m

Mm - Milímetros

°C - Graus Celsius

P - Carga aplicada pelo atuador

ϕ - Ângulo de fase

s - Intervalo de tempo entre Pmax e δ max

S - Rigidez na flexão

XX - Século 20

δ - Deflexão máxima no centro da viga

ϵ t - Deformação máxima de tração

σ t - Tensão máxima de tração

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o transporte rodoviário é o meio de locomoção e escoamento de produção mais utilizado, conforme descreve a Confederação Nacional de Transportes CNT (2017), a contribuição do modal é de mais de 61% na matriz de transporte de cargas e de 95% na de passageiros, a infraestrutura rodoviária é também a principal responsável pela integração de todo o sistema de transporte no país. Segundo o Sistema Nacional de Viação (SNV), no ano de 2017 temos 212.866 km de rodovias pavimentadas no Brasil, em contrapartida ainda temos 1.365. 426 km de rodovias não pavimentadas.

Entre os anos de 2007 e 2017, teve-se um aumento de 102,4% na frota de veículos no Brasil, e no mesmo período tivemos um crescimento de apenas 11,3% em rodovias federais pavimentadas, o aumento na frota aliado ao excesso de peso que os veículos trafegam, combinado com a falta de investimentos públicos, tem causado uma diminuição acelerada da qualidade de trafegabilidade da malha rodoviária brasileira. A falta de condições adequadas de trafegabilidade, aumenta o custo de manutenção dos veículos e conseqüentemente o preço de transporte.

Para que se tenha uma infraestrutura de transporte adequada para as condições atuais, é necessário que além de amplos e contínuos investimentos, utilize-se uma ferramenta de monitoração constante onde se pode planejar e realizar as intervenções necessárias para cada situação.

A camada de revestimento asfáltico geralmente é dimensionada para apresentar características funcionais e estruturais, do ponto de vista funcional, o revestimento tem como objetivo assegurar conforto e segurança na rolagem aos usuários, estruturalmente a camada tem a função de absorver os esforços oriundos do tráfego e transmitir as camadas subjacentes da estrutura. Nesse contexto, a mistura asfáltica que compõe uma ou mais camadas da estrutura do pavimento, tem como principais atribuições, a aderência, impermeabilidade, resistência a deformação plástica, flexibilidade e resistência à fadiga durante o seu andamento de vida útil.

A fadiga de uma mistura asfáltica, é considerada uma das principais patologias dos pavimentos rodoviários nacionais, é gerada pelo meio das cargas repetidas de

tráfego, provocando tração na parte inferior da camada de revestimento, que em estágio inicial causam fissuras no pavimento e podendo evoluir a trincas e ao rompimento por completo do pavimento.

Para determinar a fadiga de uma mistura asfáltica em laboratório, nesse estudo será utilizado o ensaio de flexão em quatro pontos, que incide em aplicar deformações controladas na fibra inferior de vigas de concreto asfáltico através de um instrumento servo controlado em vigas de concreto asfáltico usinados a quente.

1.1 OBJETIVO

Diante da degradação e da condição de superfície dos pavimentos brasileiros, o atual trabalho tem como objetivo determinar a vida de fadiga em laboratório de misturas asfálticas usinadas a quente utilizando-se ligante convencional do tipo 30/45 e ligante modificado com polímero 60/85.

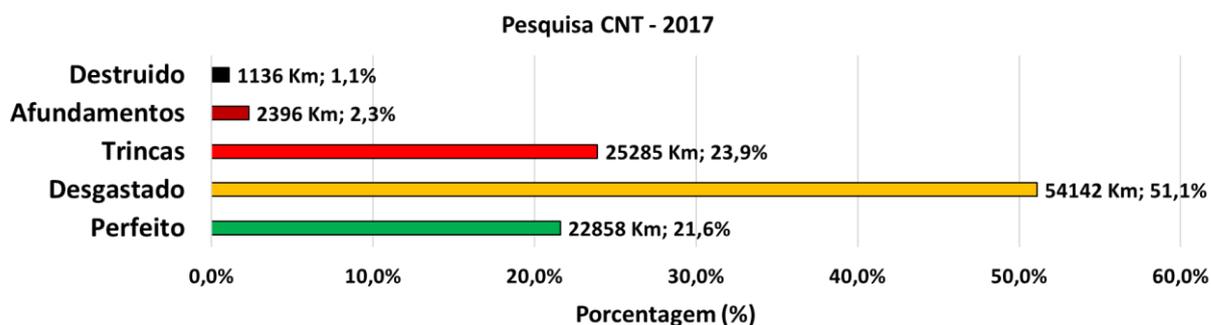
1.2 Objetivos Específicos

- Determinar as características dos materiais a constituírem o presente trabalho;
- Realizar 2 dosagens de misturas asfálticas usinadas a quente, com ligante do tipo 30/45 e ligante modificado com polímero do tipo 60/85 ambas obedecendo as tolerâncias da C DNIT ES 031/2006
- Determinar em laboratório a vida de fadiga a flexão em viga de 4 pontos das misturas asfálticas usinadas a quente.
- Realizar o comparativo entre o custo de investimento de cada tipo de mistura em comparativo direto a vida de fadiga em laboratório das misturas analisadas.

1.3 Justificativa

Com o exponencial crescimento da utilização do modal rodoviário, fez-se à necessidade de buscar alternativas de melhoras nos pavimentos asfálticos, visto que em rodovias onde o volume de tráfego é alto, os pavimentos se deterioram rapidamente, não alcançando a vida útil prevista em projeto. O gráfico 1 demonstra a situação do pavimento rodoviário nacional de acordo com o levantamento realizado pela CNT (2017). Neste trabalho, estão apresentados estudos feitos em uma mistura comumente utilizada por órgãos governamentais, a faixa C do DNIT, variando-se dois tipos de ligantes asfálticos, com objetivo de avaliar o desempenho da mistura no quesito vida útil. Os ensaios realizados neste trabalho, foram realizados no Centro de Desenvolvimento Tecnológico do grupo Arteris S.A.

Gráfico 1 - Situação do pavimento nacional



Fonte: Adaptado de CNT (2017)

1.4 Metodologia da Pesquisa

O referencial teórico deste trabalho foi alcançado a partir de bibliografias nacionais e internacionais, buscando-se feitos importantes sobre misturas asfálticas e vida de fadiga de pavimentos asfálticos, onde demonstra-se as variáveis envolvidas no desenvolvimento de misturas asfálticas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Rodrigues (2005), o transporte rodoviário é um dos modais acessíveis, dependendo apenas da existência de rodovias ou estradas trafegáveis. Este modal é indicado para curtas e médias distâncias e transporte de objetos, de maior valor agregado. A maior benfeitoria deste tipo de transporte é permitir o implante de rotas flexíveis, sendo ele um importante modal na concretização das atividades.

RAMALHO (2009) diz que, o sistema de transporte é de suma acuidade para a economia de um país, pois um produto chegaria com grandes dificuldades ou poderia até não chegar ao seu destino final, as fábricas não funcionariam, uma vez que não existiria acesso à matéria prima, e conseqüentemente, não possuiriam condições de escoar sua produção, inviabilizando assim quaisquer seguimentos.

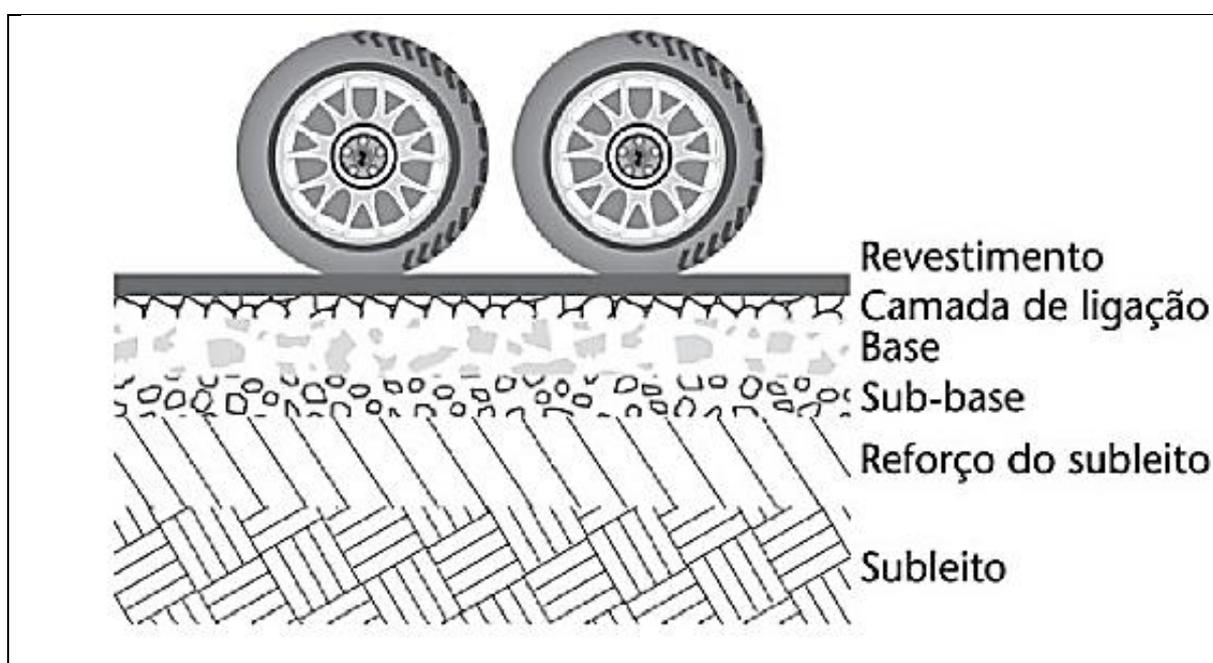
2.1 Pavimento

Segundo BERNUCCI et. al., (2006), pavimento é uma estrutura com várias camadas de espessuras finitas, edificada sobre a superfície final de terraplenagem, com a finalidade de resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, além de proporcionar aos usuários melhores condições rolamento, com conforto, economia e segurança.

De acordo com Santana (1993), tem se como conceito de pavimento a construção de uma estrutura constituída basicamente por camadas sobre a superfície de um local contemplando os serviços de terraplenagem, tendo como principal função estabelecer ao usuário conforto e segurança durante o percurso estabelecido, estes parâmetros devem ser obtidos conforme os requisitos da engenharia, visando máxima qualidade e custo reduzido.

BALBO (2007), define o pavimento como uma estrutura não inesgotável, constituída por camadas apostas de materiais compactados a partir do subleito do corpo estradal, adequada para consentir estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo mensurável, considerando horizontes distintos para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação. Na figura 1, pode-se visualizar as 5 camadas típicas constituintes de um pavimento rodoviário, em suas respectivas posições.

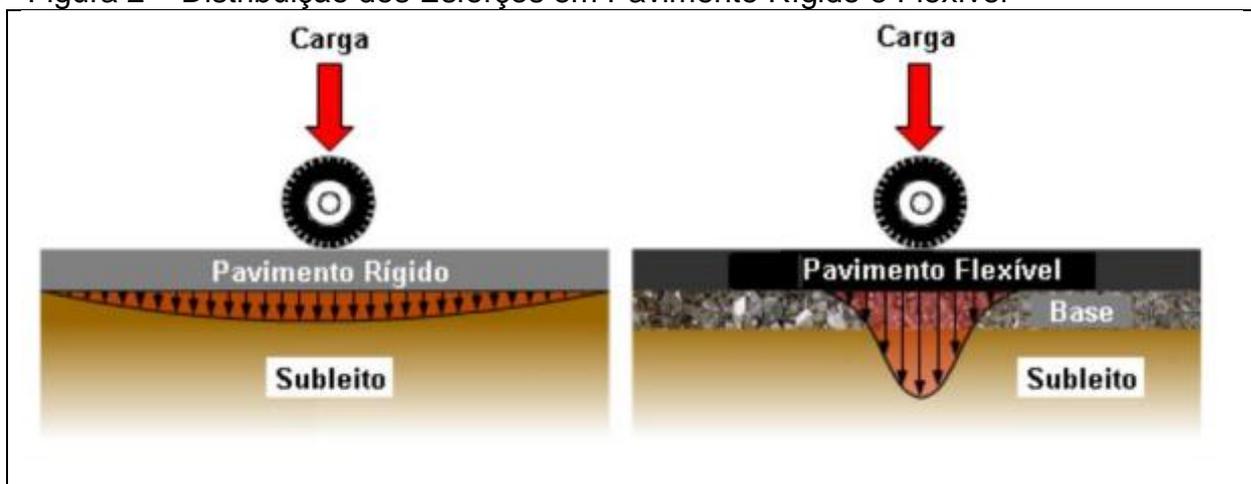
Figura 1 - Camadas do Pavimento Rodoviário



Fonte: BALBO (2007)

Segundo BERNUCCI et. al., (2006), os pavimentos asfálticos podem ser classificados em dois tipos: pavimentos rígidos e flexíveis. Atualmente as terminologias usuais são de pavimentos onde é empregado o Cimento Portland e Pavimentos Asfálticos, respectivamente, indicando a classe do pavimento. A figura 2, ilustra a distribuição dos esforços oriundos do tráfego na estrutura rígida e flexível.

Figura 2 – Distribuição dos Esforços em Pavimento Rígido e Flexível



Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2006

Segundo classificação do DNIT (2006), os pavimentos podem ser definidos como:

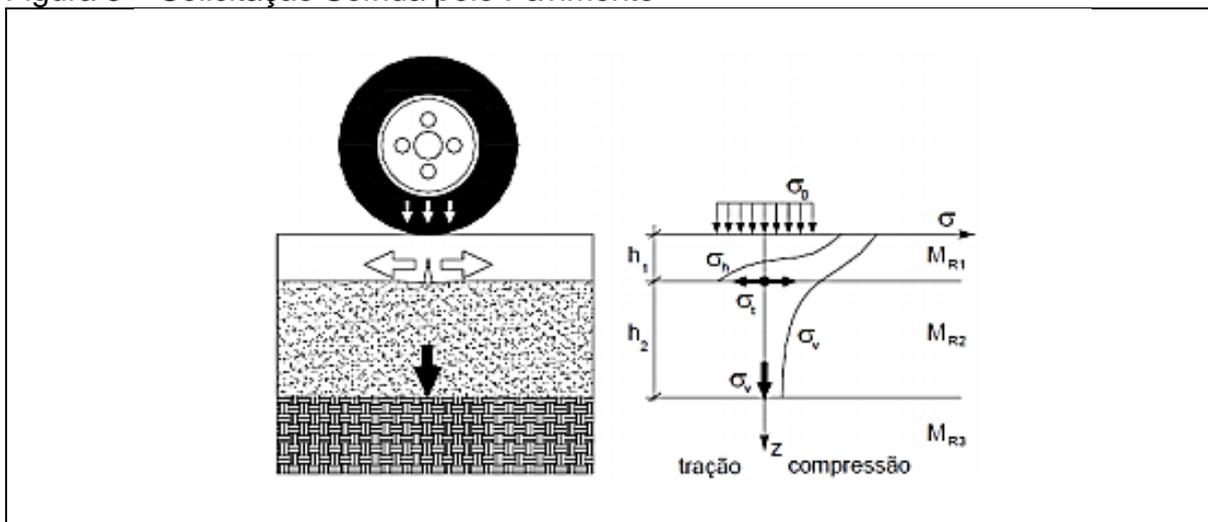
- i. Flexível: Pavimento onde a deformação elástica é proporcionada em todas as camadas devido ao carregamento aplicado, portanto, os esforços são impressos de forma equivalente entre as camadas;
- ii. Semirrígido: Caracteriza-se por uma base cimentada, coberta por uma capa asfáltica.
- iii. Rígido: O revestimento rígido absorve praticamente todas as articulações derivadas da carga aplicado sobre a estrutura, pois o revestimento tem uma elevada rigidez em analogia às camadas inferiores.

2.2 Efeitos da Ação do Tráfego

Segundo Barra (2009), as camadas constituintes de uma estrutura de pavimento são expostas aos esforços de compressão e de tração, sob o efeito do tráfego ao longo do tempo. Para que se possa, então, estudar a cinética da propagação dos danos causados a partir dos esforços impetrantes gerados pela passagem do tráfego através do tempo, é primordial o conhecimento sobre como estes esforços atuam na prática nas diversas camadas do pavimento.

As cargas repetidas impostas a camada de revestimento asfáltico através da ação do tráfego, é uma das principais causas da degradação dos pavimentos asfálticos. Essa situação vem motivando muitas instituições relacionadas a pesquisa, a interpretação e previsão desse fenômeno, a Figura 3 elucida as solicitações sofridas pelo pavimento enquanto submetida a ação vertical do carregamento:

Figura 3 – Solicitação Sofrida pelo Pavimento



Fonte: Mecânica dos Pavimentos - Medina e Motta, 2005

O fenômeno da fadiga em revestimentos asfálticos de pavimentos, motivou a partir do século XX estudos relacionados a esse tipo de patologia. GONTIJO (1980), realizou um dos primeiros trabalhos brasileiros relacionados a fadiga de revestimentos asfálticos, onde é apresentado a definição da lei de fadiga e a relação entre os modos de solicitação.

PREUSSLER, et. al., (1981), apresenta os primeiros modelos de fadiga criados em laboratório de pavimentos asfálticos, onde utilizaram como ensaios de caracterização avançada, os ensaios de módulo de resiliência e carregamento dinâmico repetitivo.

Segundo Motta (1991), um pavimento dito como flexível, compete ao revestimento asfáltico, resistir diretamente a repetição das cargas dos dessemelhantes tipos de veículos que o trafegam, no qual o acumulação dessas solicitações resulta na fadiga inevitável da mistura asfáltica aplicada, sendo este acontecimento considerado no dimensionamento de um pavimento através da

acepção de modelos que relacionam o número de solicitações de carga com o estado de tensões aplicado.

A fadiga tem sido exposta, como o processo de mudança estrutural imutável, localizada e contínua que acontece no revestimento quando este é submetido a condições de carregamentos cíclicas que produzam tensões e deformações repetidas em algum ponto, resultando em trincas ou colapso completo do material após um certo número de repetições, e também como o fenômeno de rachadura sob tensões cíclicas de valor máximo menor do que a resistência à tração do material propriamente dito (PREUSSLER, 1983).

2.3 Dosagem de Revestimento Asfáltico

BERNUCCI et. al., (2006), a dosagem de uma mistura asfáltica tem incidido até hoje na escolha, através de procedimentos experimentais, de um teor dito “ótimo” de ligante, a partir de uma faixa granulométrica predefinida. É possível que essa definição de teor ótimo de ligante seja oriunda da mecânica dos solos, onde para um determinado tipo de material, é realizado uma sequência de experimentos variando a quantidade de água adicionada a cada ponto para uma determinada energia de compactação. Portanto os projetistas costumam nomear o teor ótimo de ligante como teor de projeto.

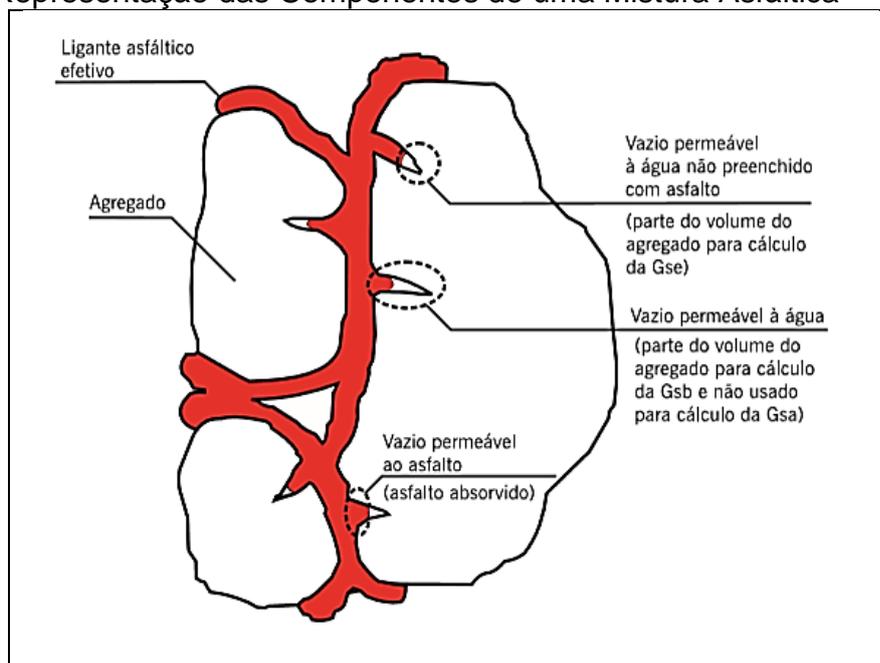
Durante a evolução dos métodos de dosagens, pesquisadores do mundo inteiro testaram diversos procedimentos de dosagens de revestimentos asfálticos, onde na década de 1940 o engenheiro Bruce Marshall desenvolveu o método de dosagem mais conhecido mundialmente, denominado método de dosagem Marshall. Segundo BERNUCCI et. al., (2006), durante a década de 1980, várias rodovias norte-americanas de tráfego pesado calharam a evidenciar deformações permanentes antecipadas, onde essas patologias foram cominadas ao excesso de ligante nas misturas nas misturas asfálticas. Pesquisadores e engenheiros confiavam que a compactação por impacto das misturas durante a dosagem resultavam em corpos-de-prova (CP) com densidades que não enquadravam com as do pavimento em campo.

O governo Norte Americano financiou um programa designado, Strategic Highway Research Program (SHRP), que resultou em um novo procedimento de dosagem por amassamento, denominado Superpave.

2.3.1 Definição das Massas Específicas

A Figura 4, apresentada pelo Asphalt Institute (1995), evidencia um esquema para compreensão do uso dos parâmetros físicos dos elementos – asfalto e agregados – em uma mistura asfáltica que serão empregados na determinação das massas específicas, aparente e efetiva, dos vazios de ar e do teor de asfalto absorvido em uma mistura asfáltica compactada.

Figura 4 - Representação das Componentes de uma Mistura Asfáltica

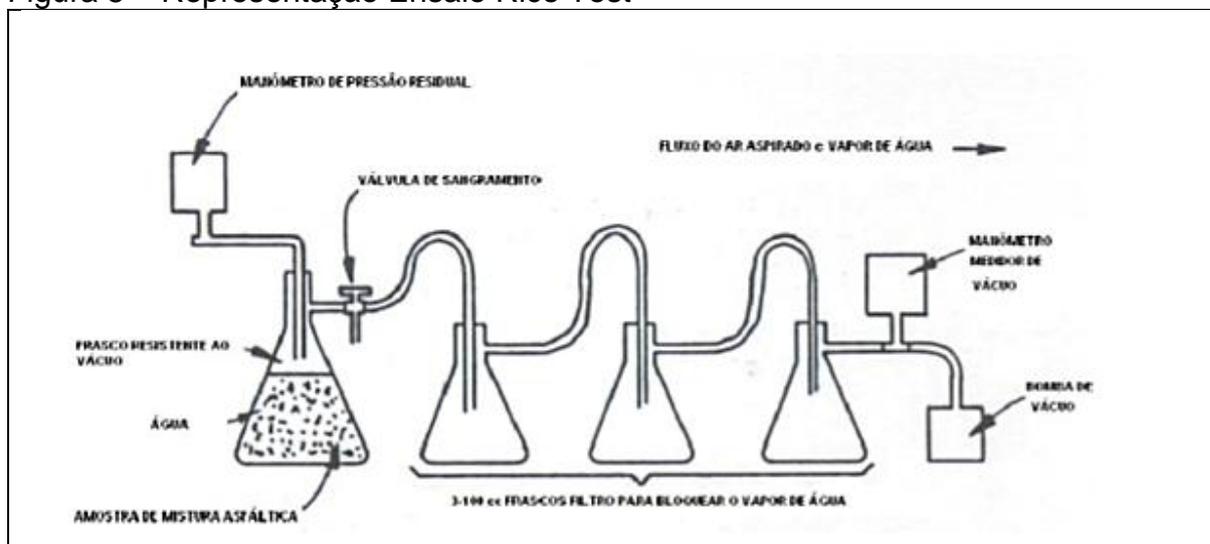


Fonte: Asphalt Institute, 1995

Para determinação da porcentagem de vazios em uma mistura asfáltica compactada, é necessário determinar a Densidade Máxima Teórica Medida através do ensaio denominado RICE TESTE que tem como finalidade imprimir uma pressão de vácuo por 15 minutos mantendo em agitação constante. A norma que regulamenta

o ensaio é AASHTO T 209. A figura 5 demonstra o esquema de ensaio, para se determinar a DMT_m .

Figura 5 – Representação Ensaio Rice Test



Fonte: AASHTO T-209, 2014

A equação 1, demonstra a formula do cálculo da densidade máxima teórica medida, conforme ASSHTO T-209,2014.

Equação 1
$$DMT_m = \frac{A}{A+B-C}$$

Na qual:

DMT_m =Densidade máxima teórica medida (g/cm³)

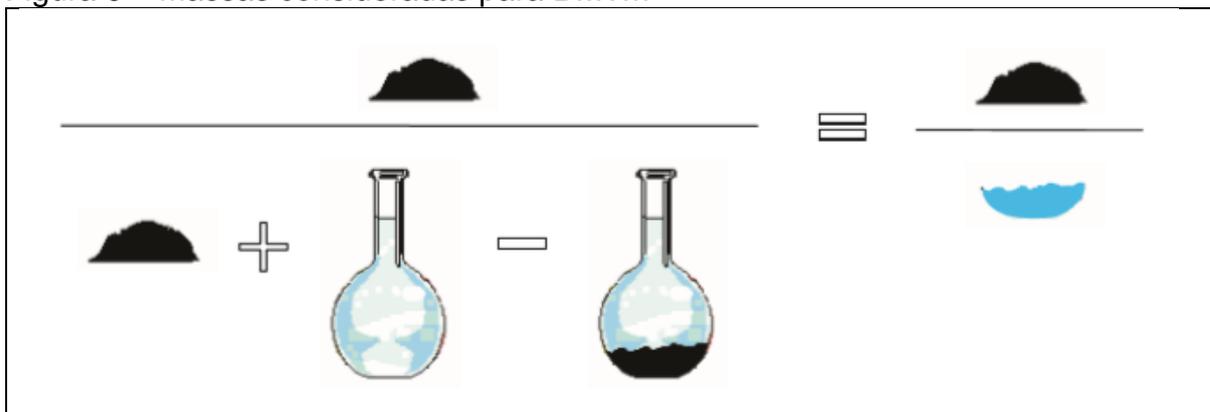
A = Peso seco da amostra (g)

B = Calibração do frasco + água a 25° C (g)

C = Calibração do frasco + amostra + água (g)

As figuras 6 abaixo demonstra as massas consideradas no ensaio de densidade máxima teórica.

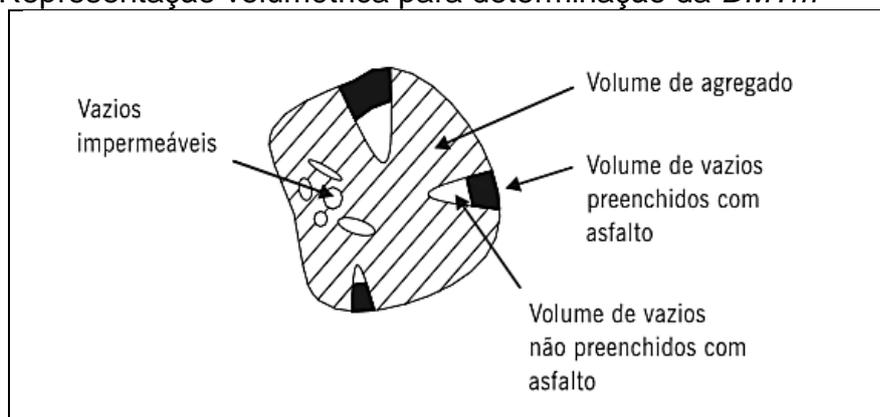
Figura 6 – Massas consideradas para *DMTm*



Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2006

A figura 7, traz a representação da volumetria utilizada para a determinação da *DMTm*, demonstrando-se os volumes utilizados.

Figura 7 – Representação volumétrica para determinação da *DMTm*

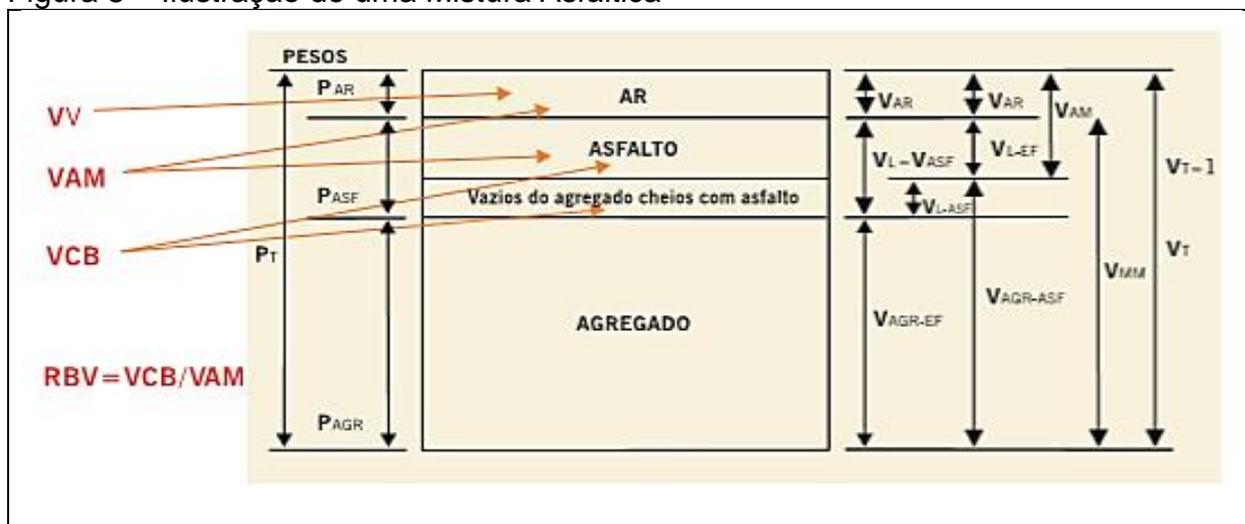


Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2006

Para se compreender melhor o conceito sobre massas específicas e volumes utilizados em uma dosagem de concreto, BERNUCCI *et al.*, (2006), define que a concepção de uma mistura como um processo volumétrico cujo escopo é determinar o volume de asfalto e agregado promovido para produzir uma mistura com as características projetadas. Porém, medidas do volume de agregados e asfalto no laboratório ou em campo são muito difíceis. Por esse motivo, para simplificar o problema das unidades de medidas, massas são usadas no lugar de volumes e a massa específica é usada para converter massa para volume. Em uma mistura

asfáltica, dois parâmetros definem o consumo de ligante a ser utilizado, o volume de vazios (%Vv) e os vazios nos agregados minerais (VAM).

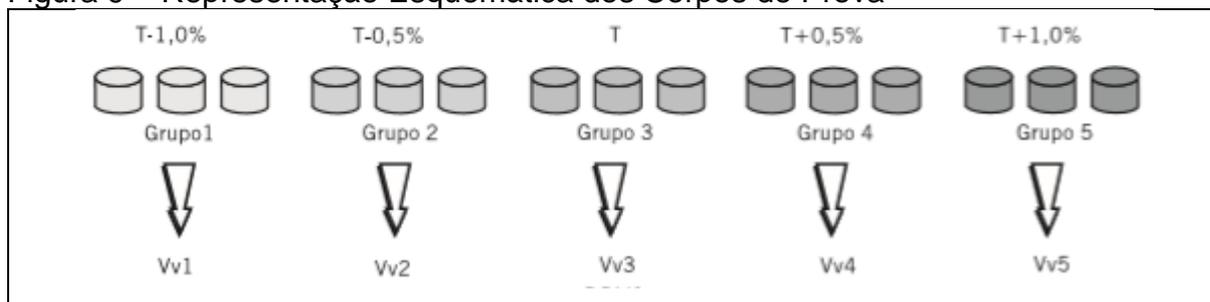
Figura 8 – Ilustração de uma Mistura Asfáltica



Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2006

Para determinarmos o teor ótimo de ligante, é necessário realizar variações de teores com a finalidade de se obter um volume de vazios de aproximadamente 4%, muitos projetistas utilizam de suas experiências para iniciar o processo de variação de ligante adicionado, o projeto Marshall determina que são necessários a moldagem de 3 exemplares para cada teor de ligante a ser adicionado.

Figura 9 – Representação Esquemática dos Corpos de Prova



Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2006

De acordo com BERNUCCI *et al.*, (2006), a norma DNER-ME 117/94 define o processo em que determina a massa específica aparente de misturas asfálticas produzidas e moldadas laboratório ou obtidos em pista. De acordo com o método, a massa específica aparente é definida como a relação entre a massa seca do corpo-

de-prova compactado e a diferença entre essa massa seca (M_s) e a massa seca do corpo-de-prova posteriormente submersa em água (M_{sub}), conforme equação 2 abaixo:

$$\text{Equação 2} \quad Mea = \frac{M_s}{M_s - M_{sub}} \times 0,9971$$

Em que:

Mea = Massa específica aparente (g/cm^3)

Ms = Massa seca (g)

Msub = Massa submersa (g)

0,9971 = Constante da água a 25°C

Os parâmetros volumétricos que tem a função de complementar os critérios em uma dosagem são calculados pelas equações 3, 4, 5 e 6 conforme abaixo:

$$\text{Equação 3} \quad \% Vv = \frac{DMTm - Mea}{DMTm}$$

Na qual:

% Vv = Porcentagem de vazios (%)

DMTm = Densidade máxima teórica medida (g/cm^3)

Mea = Massa específica aparente (g/cm^3)

$$\text{Equação 4} \quad VCB = \frac{Mea \times \%a}{Ma}$$

Em que:

VCB = Vazios cheio de betume (%)

Mea = Massa específica aparente (g/cm³)

%a = Porcentagem de asfalto (%)

Ma = Massa específica do asfalto (g/cm³)

Equação 5
$$VAM = \%Vv + VCB$$

Na qual:

VAM = Vazios do agregado mineral (%)

%Vv = Porcentagem de vazios (%)

VCB = Vazios cheio de betume (%)

Equação 6
$$RBV = \frac{VCB}{VAM}$$

Em que:

RBV = Relação betume vazios

VCB = Vazios cheio de betume (%)

VAM = Vazios do agregado mineral (%)

2.4 Fadiga em Pavimentos Asfálticos

Durante muito tempo, a causa da abertura de fendas em pavimentos asfálticos (Fadiga), foi atribuída as excessivas deformações plásticas das camadas de solo da estrutura. Uma das principais verificações do WASHO Road Test (HIGHWAY RESEARCH BOARD, 1955), foi identificar a existência da ruptura por fadiga devido às excessivas deformações impostas repetidas sem que houvesse a falência das camadas subjacentes da estrutura do pavimento asfáltico.

A elevada incidência de trincas nas camadas de revestimentos asfálticos, estão relacionadas a problemas estruturais do pavimento asfáltico, que perdem a disposição de suportar as cargas advindas do tráfego, entretanto a definição exata da causa do aparecimento de trincas é complexa e pode estar relacionada a vários fenômenos, sendo que o efeito da fadiga, nos pavimentos flexíveis, se caracteriza pelo aparecimento de trincas interligadas conhecidas como “couro de jacaré”, e com a energização do fenômeno ocorre quando existe uma separação dos blocos do revestimento provocando a não transmissão de carga entre eles, as trincas por fadiga é um dos defeitos mais evidenciados nas rodovias nacionais e muitas adversidades podem ser as causas, segundo BERNUCCI et al (2006):

- a compactação inadequada do subleito e ou das camadas representadas do pavimento, provocando uma redução na resistência da estrutura e fissuração precoce do revestimento;
- diminuição da resistência nas camadas afetadas pelo aumento de umidade, motivada pelo sistema de drenagem ineficiente,
- incompatibilização no projeto em relação quanto natureza e à espessura das camadas, principalmente da camada de revestimento asfáltico em semelhança as demais, sendo a primeira arquitetada com pequena espessura e alta rigidez, quando conferidas com as demais camadas do pavimento decorrentes das solicitações de tráfego, provocando assim, elevadas deformações no revestimento asfáltico levando-o à ruptura;
- revestimentos asfálticos projetos ou executados com teores de ligante abaixo do teor ideal;
- projeto de dosagem da mistura asfáltica impróprio, elevando à porcentagem de vazios que permite a entrada de água, mas não suficientemente permeável para

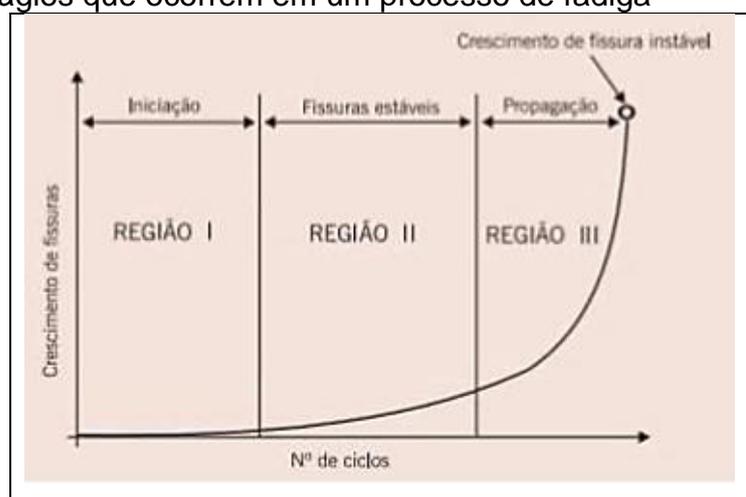
facilitar a sua saída, provocando um aumento da pressão neutra na água nos vazios, diminuindo a resistência do material; e,

- execução do revestimento asfáltico e temperatura de usinagem impróprias, entre outros fatores.

As misturas asfálticas que compõem a estrutura dos pavimentos são submetidas, em um curto intervalo de tempo, a carregamentos resultantes dos veículos que o trafegam, este carregamento faz com que ocorram microfissuras na base dos revestimentos asfálticos resultando, assim, na perda da rigidez do material, e com a intensificação do acúmulo destas microfissuras acaba gerando o fenômeno de fadiga (DI BENEDETTO et al., 2004).

Diferentes estágios podem ocorrer durante o processo de fadiga em uma camada de revestimento asfáltico submetida a um carregamento cíclico, como pode ser observado na Figura 10. A região I corresponde às primeiras mudanças microestruturais com a formação de microfissuras e, além disso, neste estágio a densidade dos deslocamentos cresce e se iniciam as zonas de danos irreversíveis. Já a região II é caracterizada pelas microfissuras que surgem devido à união das microfissuras. Por fim, na região III ocorre o crescimento das microfissuras conduzindo rapidamente ao colapso total da estrutura BERNUCCI et al., (2006).

Figura 10 - Estágios que ocorrem em um processo de fadiga



Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2008

A ASTM E206-72 (1979) define fadiga como o processo de mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões e deformações variáveis, produzindo fissuras que podem levar à ruptura após um determinado número de ciclos.

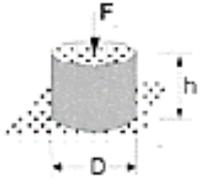
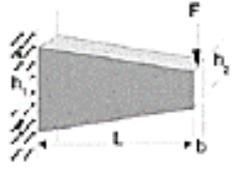
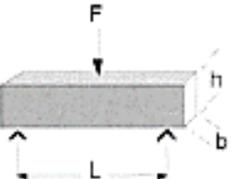
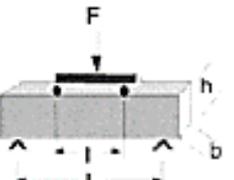
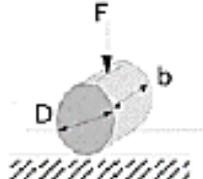
2.5 Tipos de Ensaios de Fadiga em Laboratório

Segundo DI BENEDETTO et al. (2004), os ensaios laboratoriais são fundamentais para a determinação de modelos de fadiga estabelecidos pela relação entre o estado de tensão-deformação e o número de ciclos de carga até atingir a ruptura, sendo que estes ensaios consideram cargas repetidas com diferentes níveis de tensão ou deformação, devendo reproduzir o mais próximo possível as condições estabelecidas em campo para as misturas utilizadas nas camadas de revestimento asfáltico. Resultados obtidos nos ensaios de fadiga são influenciados pelas condições de carregamento e pelas configurações usadas; por isso, são extremamente importantes a calibração dos transdutores LVDT, o alinhamento da face superior e inferior dos corpos de prova, o ajuste dos sinais de carregamentos impostos, a rigidez do equipamento, para não influenciar nas leituras de força e deslocamento, e a verificação adequada da aquisição dos dados.

Diferentes tipos de ensaios podem ser realizados em laboratórios para estudar a resistência à fadiga em misturas asfálticas, a figura 11, mostra as características dos ensaios utilizados para determinar a resistência à fadiga de misturas asfálticas.

Segundo MELLO (2008), os ensaios de laboratório utilizados para estabelecer a vida de fadiga de misturas asfálticas podem apresentar divergências em função das condições do equipamento e do carregamento solicitado, necessitando-se, de uma análise minuciosa das respostas. Abaixo será apresentado um resumo dos três tipos de ensaios comumente utilizados no Brasil para determinar a vida de fadiga de materiais asfálticos em relação à configuração, tipos e modo de carregamento, condições de ensaio e procedimentos de análise.

Figura 11 – Tipos de Ensaios de Fadiga

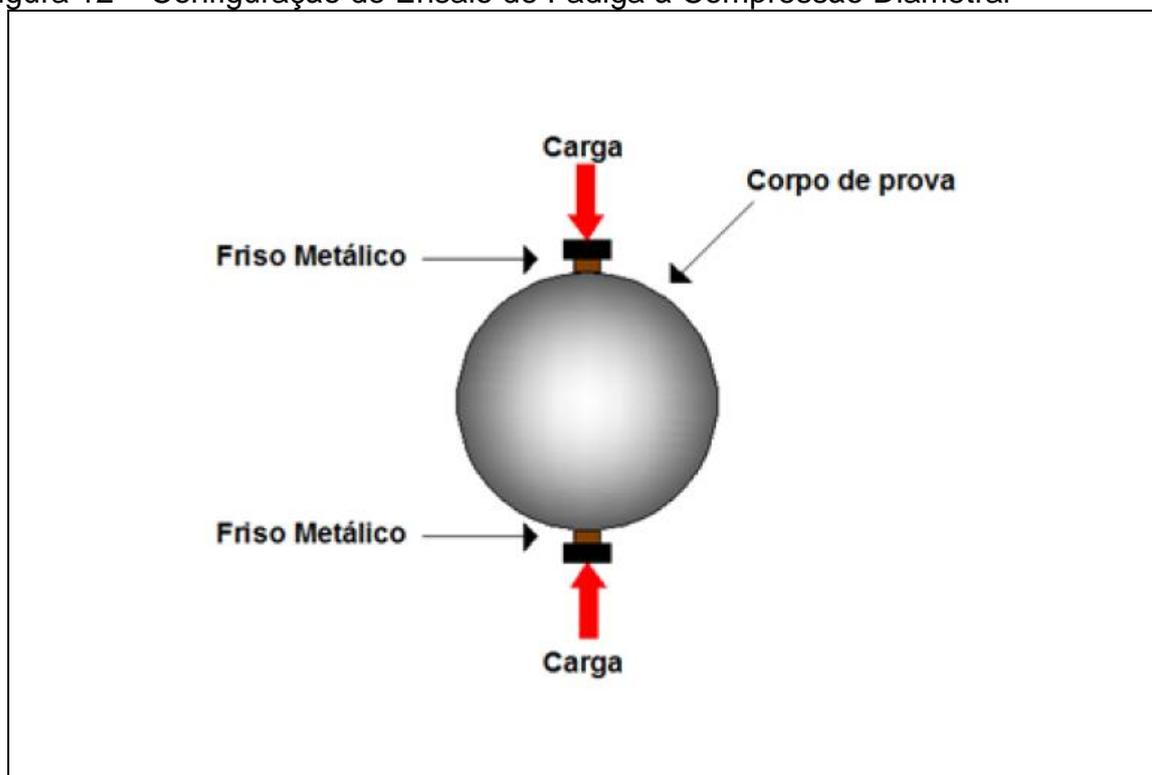
Type	Test Geometry	Type of loading/ Country of the team	Amplitude (10^{-6} m/m or MPa)
T/C		Tension- Compression “Homogeneous” F_1, S_1	Strain: (80), 100, 140, 180 Stress: 0.9
2PB		Two-Point Bending “Non Homogeneous” F_2, B_1, B_2	Displacement; max strain: 140, 180, 220 Load; max stress: 1.4
3PB		Three-Point Bending “Non Homogeneous” N_1	Displacement; max strain: 140, 180, 220 Load; max stress: 1.4
4PB		Four-Point Bending “Non Homogeneous” N_2, P, PL, UK	Displacement; max strain: 140, 180, 220 Load; max stress: 1.4
ITT		Indirect Tensile Test “Non Homogeneous” S_2	Load; max strain: at first cycle: ~25, ~40, ~65

Fonte: DI BENEDETTO *et al.*, 2004

2.5.1 Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral

Segundo COLPO (2014), o ensaio de compressão diametral foi desenvolvido em 1943 pelo brasileiro Fernando Luiz Lobo B. Carneiro, com intuito de buscar, inicialmente, a resistência à tração (RT) de corpos de prova cilíndricos de concreto de cimento Portland, no ensaio de compressão diametral utiliza-se corpos de prova cilíndricos que são submetidos a compressão, atuando paralelamente ao plano diametral vertical do corpo de prova, promovendo, uma tensão de tração uniforme no corpo de prova, perpendicular à direção de aplicação da carga e ao longo do plano diametral vertical do corpo de prova, como é mostrado na figura 12.

Figura 12 – Configuração do Ensaio de Fadiga à Compressão Diametral



Fonte: Colpo, (2014)

Segundo MEDINA E MOTTA (2005), a tipologia de ensaio de fadiga por compressão diametral é a mais utilizado para estimar a vida de fadiga de misturas asfálticas no Brasil. Neste ensaio, as tensões são controladas podendo ser executado no mesmo equipamento utilizado para o ensaio de módulo de resiliência (MR) por compressão diametral, à temperatura de 25°C, no ensaio, a carga aplicada conduz a

níveis de tensões normais horizontais de 10% a 50% da tensão de ruptura do corpo de prova a tração, ocasionando o trincamento total e posterior ruptura do corpo de prova.

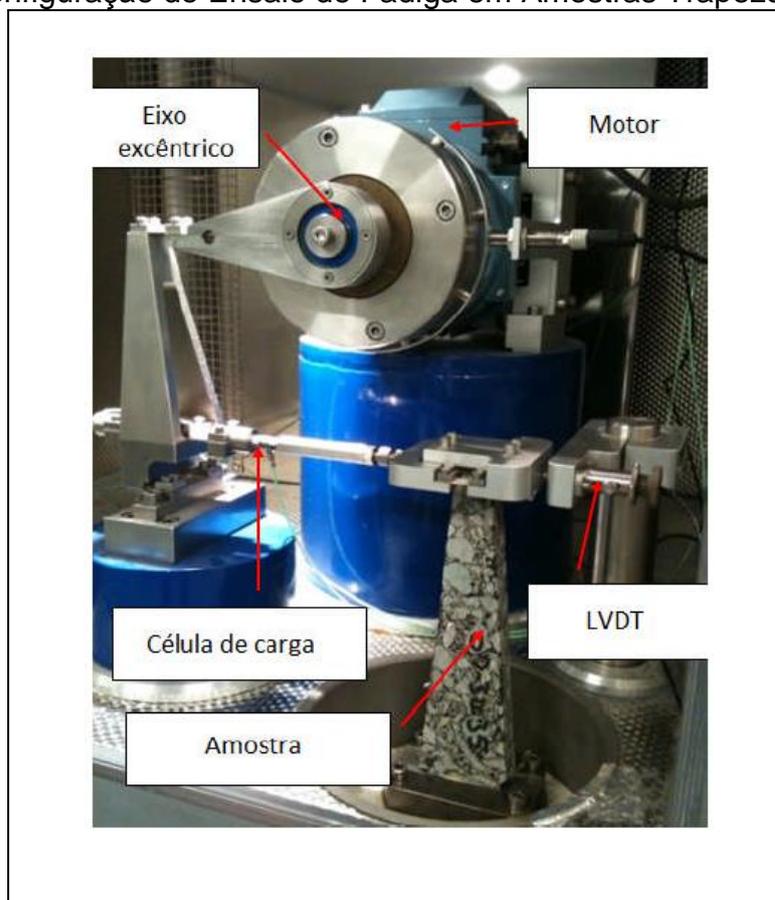
2.5.2 Ensaio de Fadiga à Flexão em Corpos de Prova Trapezoidais

BALBO (2007), explica que a escola francesa desenvolveu um equipamento para execução de ensaios de fadiga, a deformação controlada, com emprego de corpos de prova trapezoidais, nesta tipologia, ocorre a aplicação de força na menor seção da amostra, enquanto a outra extremidade fica engastada em uma base, como mostra a figura 13, o ensaio simula esforços de flexão e é realizado com frequências inferiores a 20 Hz.

Segundo COLPO (2014), o ensaio de fadiga à flexão em corpos de prova trapezoidais foi desenvolvido na França e normatizado pela norma NF P 98-261-1 em 1993, após isso, foi prescrito pela norma europeia EN 12697:24. O ensaio é realizado em corpos de prova trapezoidais com dimensões de 70,0 mm (base maior) x 25,0 mm (base menor) x 25,0 mm (espessura) x 250,0 mm (altura), à temperatura controlada de 10°C e com frequência de 25Hz, sendo o carregamento aplicado sob o modo de deformação controlada ou tensão controlada.

COLPO (2014), explica que o ensaio é finalizado quando a tensão aplicada é reduzida de 50% em relação a tensão inicial aplicada. O modelo de fadiga para este ensaio é definido pelo gráfico obtido através do número de solicitações por nível de deformação de tração. Segundo LOUREIRO (2003), neste gráfico devem conter os valores de deformação referentes a um milhão de ciclos e que se deve empregar como critério de aceitação dos resultados, o valor de 95% de intervalo de confiança para a variância do número de solicitações em cada ensaio. A curva de fadiga é obtida a partir da execução do ensaio em três níveis de deformação, com seis corpos de prova por nível.

Figura 13 – Configuração do Ensaio de Fadiga em Amostras Trapezoidais



Fonte: Colpo, (2014)

2.5.3 Ensaio de Fadiga à Flexão em Viga Apoiada em Quatro Pontos

Segundo COLPO (2014), o ensaio de flexão em viga de quatro pontos é frequentemente utilizado nos Estados Unidos, Europa e Austrália, sendo normatizado pelas normas da AASHTO T-321, ASTM D7460 e pela norma europeia EN 12697:24, conforme demonstrado na figura 14.

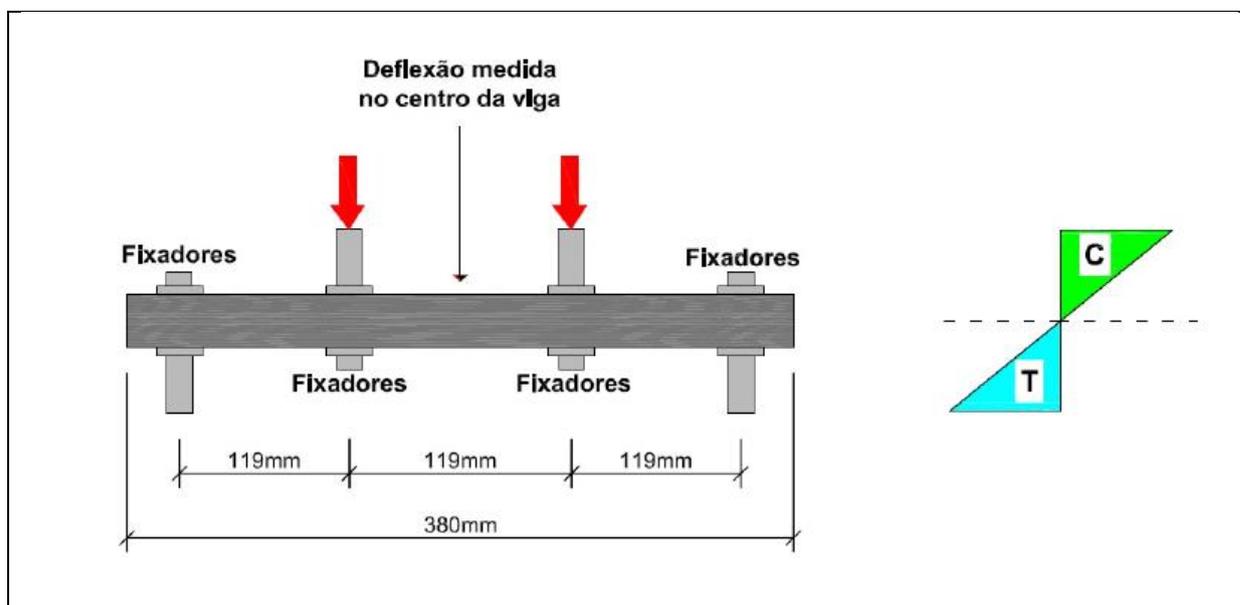
LOUREIRO (2003) diz que no ensaio de flexão em viga quatro pontos com carregamento à tensão controlada geralmente utiliza-se como critério de término do ensaio o número de solicitações até a ruptura total da amostra, enquanto que no modo de deformação controlada, o critério de término empregado é a redução em 60% da rigidez inicial da mistura, representada pelo módulo de rigidez à flexão inicial, a trinca

que pode manifestar-se na viga no decorrer do ensaio é comumente única, sendo formada no local onde o momento fletor é máximo.

Segundo FONTES (2009), as principais vantagens dos ensaios de flexão 4 pontos são as seguintes:

- Os ensaios são conhecidos sendo de uso generalizado e de fácil compreensão;
- Os resultados podem ser usados diretamente no dimensionamento estrutural de pavimentos;
- Os resultados obtidos sob tensão controlada podem ser usados para o dimensionamento de pavimentos cuja espessura betuminosa é considerável, enquanto que os obtidos em deformação controlada podem ser usados para pavimentos de reduzida espessura betuminosa;
- Na flexão em quatro pontos, a ruptura do corpo de prova ocorre numa zona de tensão uniforme e sem tensões de cisalhamento, este fato diminui o coeficiente de variação entre ensaios.

Figura 14 – Configuração do ensaio de fadiga a flexão 4 pontos



Fonte: Colpo, (2014)

Nos ensaios para determinação da vida de fadiga de misturas asfálticas em laboratório o modo de carregamento empregado para esse estudo será de

deformação controlada (DC), onde serão realizados os ensaios com as deformações de 300, 400 a 500 microstrains. Para obtenção dos resultados, é necessário que o equipamento atenda aos requisitos mínimos para ensaio. A tabela 1 descreve tais requisitos.

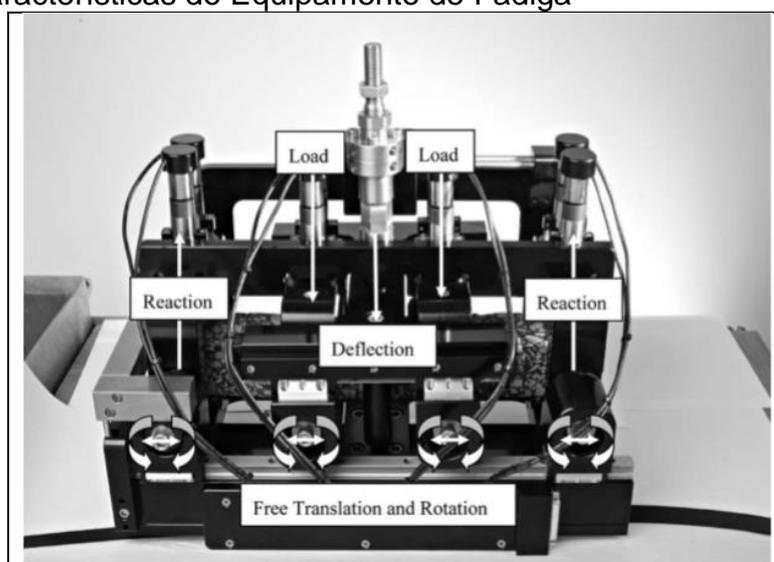
Tabela 1 – Requisitos mínimos

Requerimentos para o sistema de medição e controle	
Medição e controle de carregamento	Range 0 a 5 kN
	Resolução 2,5 N
	Precisão 5 N
Medição e controle de deslocamento	Range 0 a 5 mm
Temperatura de controle	Resolução de $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$
Sensor de deslocamento	Transdutor diferencial variável linear (LVDT)

Fonte: ASTM - D7460, (2010)

A figura 15 demonstra as características do equipamento utilizado no ensaio de fadiga 4 pontos.

Figura 15 – Características do Equipamento de Fadiga



Fonte: ASTM - D7460, (2010)

As equações 7, 8, 9 e 10 demonstradas a seguir são utilizados no ensaio para os cálculos da fadiga dos materiais betuminosos.

Equação 7
$$\sigma t = \frac{3xaxP}{bxh^2}$$

Na qual:

σt = Tensão máxima de tração (Pa).

a = Distância entre o centro e os fixadores em metros – 0,1185 m.

P = Carga aplicada pelo atuador (N).

b = Largura média do corpo de prova (m)

h = Altura média do corpo de prova (m).

Equação 8
$$\epsilon t = \frac{12x\delta xh}{(3xL^2)-(4xa^2)}$$

Em que:

ϵt = Deformação máxima de tração (m/m).

δ = Deflexão máxima no centro da viga (m).

a = Distância entre o centro e os fixadores em metros – 0,1185 m.

L = Comprimento entre os grampos externos em metros – 0,3555 m.

Equação 9
$$S = \frac{\sigma t}{\epsilon t}$$

Na qual:

S = Rigidez na flexão (Pa).

σt = Tensão máxima de tração (Pa).

ϵt = Deformação máxima de tração (m/m).

Equação 10
$$\varphi = 360xfxs$$

ϕ = Ângulo de fase (grau).

f = Frequência de carregamento (Hz)

s = Intervalo de tempo entre P_{max} e δ_{max} (s).

2.6 Agregados Graúdos e Miúdos

De acordo com a norma ABNT NBR 9935/2005, o termo agregado é definido como material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e de concreto. Para BERNUCCI (2006), agregado é um termo genérico para areias, pedregulhos e rochas minerais em seu estado natural ou britadas em seu estado processado.

SENÇO (2007), explica que na engenharia civil, os agregados são materiais granulares, inerentes, sem forma e dimensões definidas podendo ser utilizados para diversos tipos de obra, na pavimentação suas aplicações são destinadas nas misturas betuminosas, lastro de obras, concreto de cimento e outros. Quando empregado em misturas, os agregados têm a maior representação em volume em relação aos demais componentes utilizados. Segundo BERNUCCI (2006), os agregados podem ser classificados conforme:

- i. Natureza
 - a. Natural - Inclui todas as fontes de ocorrência natural e são obtidos por processos convencionais de desmonte, escavação e dragagem em depósitos continentais, marinhos, estuários e rios. São exemplos os pedregulhos, as britas, os seixos, as areias etc.
 - b. Artificial – Os agregados artificiais, são obtidos através do processo industrial, tipicamente de britagem.
 - c. Reciclado - Nessa categoria se enquadram os agregados provenientes de reuso de materiais diversos.
- ii. Quanto ao seu tamanho

- a. Agregado Graúdo - Material com dimensões maiores do que 2,0mm, ou seja, retido na peneira no 10. São as britas, cascalhos, seixos etc.
- b. Agregado Miúdo - Material com dimensões maiores que 0,075mm e menores que 2,0mm. É o material que é retido na peneira de no 200, mas que passa na de abertura no 10. São as areias, o pó de pedra etc.
- c. Material de Enchimento (fíler) – Material onde pelo menos 65% das partículas é menor que 0,075mm, correspondente à peneira de no 200, e.g., cal hidratada, cimento Portland etc.

iii. Quanto a Distribuição de Grãos

A distribuição granulométrica dos agregados é uma de suas principais características e efetivamente influi no comportamento dos revestimentos asfálticos, na tabela 2 estão expressas as 3 faixas granulométricas utilizadas nacionalmente conforme a especificação do DNIT 031/2006-ES.

Tabela 2 Faixas Granulométricas DNIT

Peneiras		% em Massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1½"	38,1	95 - 100	100	-	± 7%
1"	25,4	75 - 100	95 -100	-	± 7%
¾"	19,1	60 – 90	80 – 100	100	± 7%
½"	12,7	-	-	80 - 100	± 7%
3/8"	9,5	35 – 65	45 – 80	70 - 90	± 7%
Nº 4	4,8	25 – 50	28 – 60	44 - 72	± 5%
Nº 10	2	20 – 40	20 -45	22 - 50	± 5%
Nº 40	0,42	10 - 30	10 – 32	8 - 26	± 5%
Nº 80	0,18	5 - 20	8 -20	4 -16	± 3%
Nº 200	0,075	1 – 8	3 – 8	2 -10	± 2%
Asfalto solúvel no CS2(+) (%)		4,0 - 7,0	4,5 - 7,5	4,5 - 9,0	± 0,3%
		Camada de ligação (Binder)	Camada de ligação e rolamento	Camada de rolamento	

Fonte: DNIT 031/2006-ES

Com a finalidade de atender as características físicas e mecânicas dos agregados previstos na especificação de concreto asfáltico (DNIT 031/2006-ES), foram realizados em laboratório os ensaios conforme descritos a seguir:

- I. Granulometria (DNER-ME083/98)
- II. Abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98)
- III. Índice de Forma (DNER-ME 086/94)
- IV. Durabilidade ao Sulfato de Sódio (DNER-ME 089/94)
- V. Equivalente de Areia (DNER-ME 054/94)

2.7 Ligante Asfáltico

O Asphalt Institute, dos EUA, define que ligante asfáltico de petróleo ou apenas ligantes asfálticos são os cimentos asfálticos com ou sem a adição de agentes modificadores, os quais não devem ser maiores do que 250 μm .

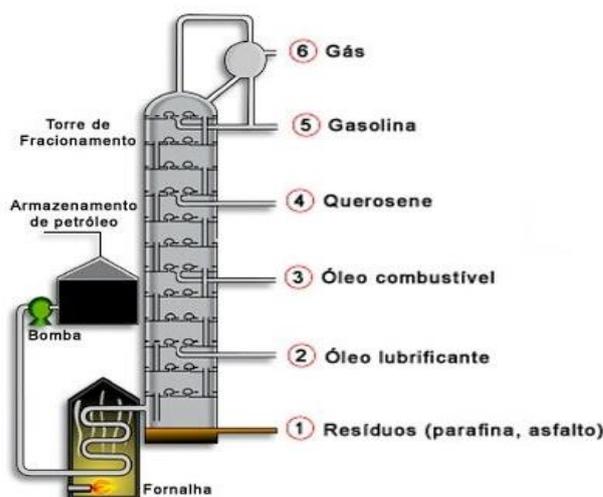
Segundo LEITE (1999), para que o ligante asfáltico tenha um bom desempenho no pavimento, ele deve apresentar propriedades diferenciadas no que diz respeito ao comportamento dos demais materiais asfálticos, o ligante deve apresentar maior coesão e adesão aos agregados, elevada resistência ao envelhecimento, susceptibilidade térmica adequada a faixa de utilização de temperatura do pavimento, alta resistência à fadiga e à deformação térmica.

De acordo com a especificação europeia (2000), asfalto é definido como o material à prova d'água, aglutinante, completamente solúvel em tolueno, muito viscoso, quase com um comportamento de sólido a temperatura ambiente, podendo ser obtido pelo refino do óleo cru ou estar presente na natureza.

O ligante asfáltico é um material que promove uma forte união entre agregados, BERNUCCI et. al., (2006), define que 95% das rodovias brasileiras são pavimentadas com revestimento asfáltico. Existem inúmeras razões para utilização desse material na pavimentação, podemos chamar a atenção para característica impermeável e flexibilidade controlável. Os ligantes asfálticos são compostos pelas frações pesadas do petróleo denominadas basicamente de Asfaltenos e Maltenos podendo ser obtido através do processo de destilação ou por extração em lagos naturais, as figuras 16 e 17 mostram respectivamente esses dois métodos para obtenção.

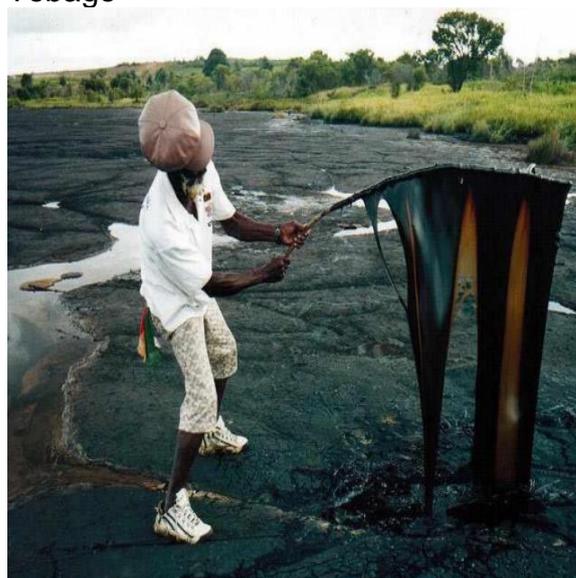
Segundo MOTHÉ (2009), os ligantes asfálticos possuem três grandes divisões, os ligantes asfálticos naturais, os ligantes asfálticos de petróleo e o Alcatrão, explica ainda que os asfaltos naturais são depósitos de petróleo que surge na superfície da terra, sofrendo assim uma destilação natural pela ação do vento e do sol, que retiram os gases e óleos leves, deixando um resíduo muito duro que é o asfalto natural.

Figura 16 - Torre de Destilação Fracionada



Fonte: Petrobras

Figura 17 – Lago Natural Trinidad e Tobago



Fonte: Colpo, (2014)

2.8 Tipos de Ligantes Asfálticos de Petróleo

Os ligantes asfálticos de petróleo podem ser divididos em dois tipos: os destinados a pavimentação e os destinados a indústria. Os asfaltos para pavimentação são: cimento asfáltico petróleo, asfalto diluído e emulsão asfáltica MOTHÉ (2009).

Segundo DNER (1996), o cimento asfáltico de petróleo é obtido especialmente para apresentar características adequadas para o uso na construção de pavimentos, podendo ser obtido pela destilação do petróleo em refinarias. O cimento asfáltico de petróleo (CAP), é um produto obtido no fundo da torre de destilação a vácuo, de acordo com as especificações brasileiras, em temperatura ambiente são semissólidos e precisam ser aquecidos para adquirir a consistência adequada para serem misturados com os agregados. São flexíveis, impermeáveis, aglutináveis e resistentes

a ação da maioria de ácidos, sais e álcalis. O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem e o Instituto Brasileiro de Petróleo especificaram quatro tipos de CAP, segundo sua penetração.

- ✓ CAP 30/45
- ✓ CAP 50/60
- ✓ CAP 85/100
- ✓ CAP 150/200

De acordo com a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP) o ligante asfáltico é classificado conforme seu grau de dureza, através do ensaio de penetração a 25 °C (PN) as figuras 18 e 19 ilustram o ensaio, a tabela 3 mostra a classificação de 4 tipos de ligante.

Figura 18 – Moldagem da cápsula para ensaio



Figura 19 - Penetrômetro para determinação da penetração do ligante asfáltico



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

Tabela 3 - Classificação dos Ligantes Convencionais

Características	Unid.	Valores					
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200	ABNT	ASTM
Penetração (100g,5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	150 a 200
Ponto de amolecimento, mín	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-Furol,							
135°C, mín.	S	192	141	110	80	NBR 14950	E102
150°C, mín.		90	50	43	36		
177°C, mín.		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60		
Viscosidade Brookfield							
a 135°C, mín. SP 21, 20rpm, mín.		374	274	214	155	NBR 15184	D 4402
a 150°C, mín.		203	112	97	81		
a 177°C, SP 21		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114		
Índice de Suscetibilidade Térmica		(-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
Dutilidade a 25°C, mín.	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
Efeito do calor e do ar, 163°C por 85 min.							
Varição em massa, máx.	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		D 2872
Dutilidade a 25°C, mín.	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín.	%	60,0	55,0	55,0	60,0	NBR 7576	D 5

(*) Relação entre a penetração após o efeito do calor e do ar em estufa RTFOT e a penetração original, antes do ensaio do efeito do calor e do ar.

Fonte: ANP (2005)

2.8.1 Asfalto Modificado

MOTHÉ (2009), explica que os asfaltos modificados podem ser subdivididos em:

- Asfaltos modificados por polímeros
- Agentes de rejuvenescimento
- Asfaltos modificados por produtos naturais

Segundo o IBP, 1999, os asfaltos modificados por polímeros, conforme tabela 4 são classificados de acordo com o seu ponto de amolecimento (PA) e a sua capacidade de retornar a uma determinada posição após sofrer uma solicitação denominada recuperação elástica (RE), esse comportamento é obtido através da

adição do polímero ao CAP, podendo sofrer reação química, para que haja essa modificação, é necessário que o CAP possua compatibilidade com o polímero a ser adicionado, certas vantagens dessa modificação podem incluir a diminuição a suscetibilidade térmica; o aumento da resistência a deformação permanente; melhora na adesão e coesão; aumento na resistência ao envelhecimento e etc. Comumente utilizados na reciclagem de revestimento de forma a reduzir a viscosidade e de reposição dos compostos aromáticos do ligante envelhecido, restabelecendo assim, suas características químicas e físicas. A figura 20 demonstra o equipamento para determinação da recuperação elástica.

Figura 20 - Ductilômetro



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

Neste tipo de asfalto são adicionados produtos naturais (fibras, asfalto natural, enxofre) de forma a melhorar algumas das características mecânicas, porém, estes ligantes são pouco utilizados na pavimentação (IBP, 1999).

Devido ao aumento do carregamento rodoviário, pesquisadores do mundo inteiro testaram ao longo da história vários tipos de adições ao ligante asfáltico com a

finalidade de melhorar o seu comportamento mecânico, o presente trabalho utilizara o ligante modificado com SBS (estireno-butadieno-estireno) do tipo 60/85.

Tabela 4 - Classificação dos Ligantes Modificados

Características	Unid.	Valores				
		CAP 55/75-E	CAP 60/85-E	CAP 65/90-E	ABNT	ASTM
Penetração (100g,5s, 25°C)	0,1mm	45 a 70	40 a 70	40 a 70	NBR 6576	D5
Ponto de amolecimento, min	°C	55	60	65	NBR 6560	D 36
Viscosidade Brookfield						
a 135°C, mín. SP 21, 20rpm, mín.		3000			NBR 15184	D 4402
a 150°C, mín.		2000				
a 177°C, SP 21		1000				
Ponto de fulgor, mín.	°C	235			NBR 11341	D 92
Ensaio de separação de fase, máx	°C	5			NBR 15166	D 7173
Recuperação elástica a 25°C C 20cm, min	%	75	85	90	NBR 15086	D 6084
Efeito do calor e do ar, 163°C por 85 min.						
Varição em massa, máx.	% massa	1				D 2872
Percentagem de recuperação elástica original	%	80			NBR 15086	D 6084
Aumento do ponto de amolecimento	°C	- 5 a +7			NBR 6560	D 36
Percentagem de penetração original, mín.	%	60			NBR 6576	D 5

Fonte: ANP, (2005)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta etapa do trabalho, estão descritos os tipos de materiais utilizados e as metodologias adotadas para produzir os resultados que serão analisados posteriormente. Todos ensaios laboratoriais aqui descritos, foram realizados pelo próprio autor no Centro de Desenvolvimento tecnológico da Arteris (CDT).

3.1 Agregados Graúdos e Miúdos

Neste estudo foram empregados agregados graúdos de origem mineral do tipo gnaisse, proveniente da pedreira Britasul, situada em Pouso Alegre - MG. É um material com as características pétreas encontradas no sul de Minas Gerais, este agregado foi definido para compor a matriz pétreo do presente trabalho. A coleta das amostras, conforme as figuras 21, 22, 23 e 24, foi realizada segundo a especificação (DNER-PRO 120/97), e a redução das amostras em laboratório foi de acordo com a especificação (DNER-PRO 199/96).

Figura 21 – Homogeneização mecânica



Figura 22 – Homogeneização mecânica



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

Figura 23 – Coleta com o auxílio da pá



Figura 24 – Detalhe do local da coleta



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

Para compor a curva granulométrica do presente trabalho, foram selecionadas três frações classificadas na unidade industrial da pedreira: brita 1 (19 mm), pedrisco (9,5 mm) e pó de pedra (4,8 mm).

3.1.1 Características Físicas e Mecânicas dos Agregados

Os agregados graúdos foram ensaiados conforme descrito no subitem 2.6 para a obtenção dos seus parâmetros físicos e mecânicos. Na tabela 5 são apontados os resultados obtidos com base nos parâmetros especificados nas normas.

Tabela 5: Caracterização dos agregados graúdos.

Descrição do Ensaio	Valor Obtido	Valor Especificado
Abrasão Los Angeles	23%	< 50%
Índice de Forma	2	> 0,5
Durabilidade ao Sulfato de Sódio	3%	< 12%
Equivalente de Areia	63%	> 55%

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

3.2 Composição Granulométrica

A composição granulométrica foi definida afim de atender as tolerâncias especificadas na Faixa C do DNIT conforme tabela 6. A fim de melhorar a adesividade do filme de ligante asfáltico com os agregados, foi definido como material de enchimento e melhorador de adesividade, a incorporação de 1,5% de Cal Hidratada do tipo CH-1.

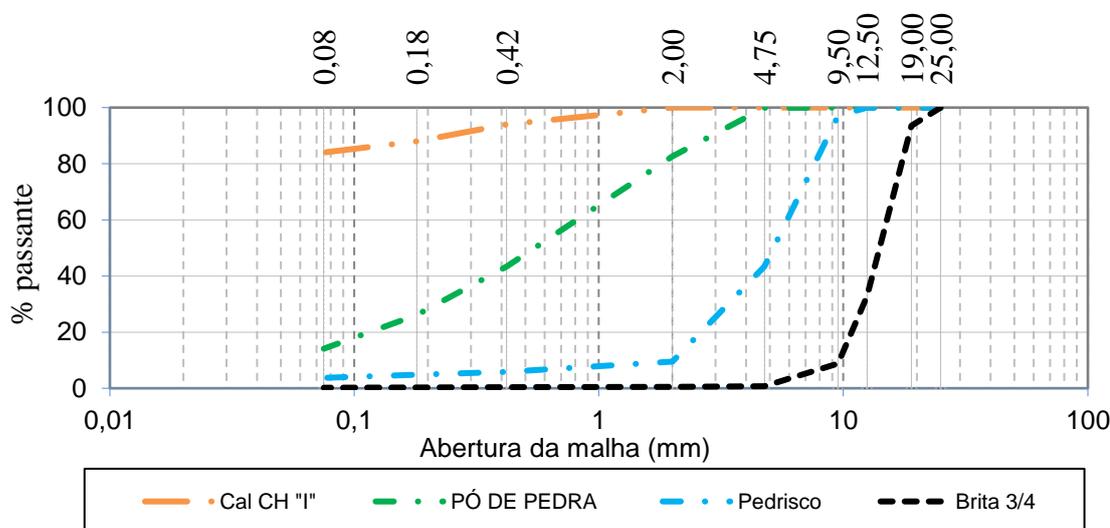
Tabela 6 – Composição granulométrica para enquadramento na faixa C do DNIT.

Peneiras		Brita 3/4	Pedrisco	Pó de pedra	Cal CH-1	Mistura obtida	Faixa C DNIT	
ASTM	mm						Lim. inferior	Lim. superior
1"	25,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100
3/4"	19,0	93,5	100,0	100,0	100,0	99	100	100
1/2"	12,5	32,8	100,0	100,0	100,0	87	80	100
3/8"	9,5	8,8	97,0	100,0	100,0	80	70	90
Nº 4	4,8	0,7	43,4	99,9	100,0	54	44	72
Nº 10	2,0	0,5	9,5	82,6	100,0	33	22	50
Nº 40	0,42	0,4	5,8	43,4	94,0	18	8	26
Nº 80	0,18	0,3	4,8	26,1	88,0	12	4	16
Nº 200	0,075	0,2	3,7	14,1	84	7,6	2	10

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

O gráfico 2 demonstra a distribuição granulométrica da brita 3/4, pedrisco, pó de pedra e da cal hidratada do tipo CH-1.

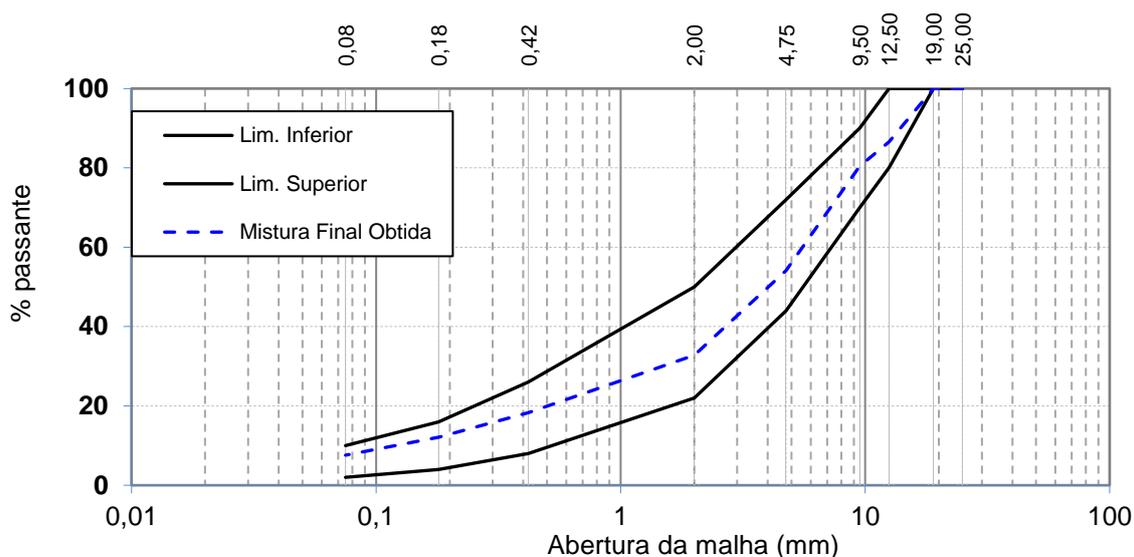
Gráfico 2 – Granulometria Individual dos materiais



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

Com base em parâmetros obtidos nos ensaios de granulometria, foi definido a composição granulométrica apresentada no gráfico 3, na qual pode-se verificar o enquadramento da mistura obtida dentro dos limites superior e inferior da faixa C do DNIT.

Gráfico 3 – Composição granulométrica



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

3.3 Preparação e Moldagem dos Corpos de Prova

A determinação da porcentagem ótima de ligante e dos parâmetros volumétricos das misturas betuminosas com ligante convencional 30/45 e modificado 60/85, foi realizada através da metodologia Marshall. As figuras de 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32 e 33 demonstram o passo a passo do procedimento utilizado para obtenção do teor ótimo de ligante para cada projeto e seus respectivos parâmetros volumétricos.

Figura 25 – Agregados fracionados



Figura 26 -Detalhe do agregado fracionado



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

Figura 27 - Pesagem de cada corpo de prova



Figura 28 – Corpos de prova pesados e prontos para mistura



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

Figura 29 – Adição do ligante asfáltico para mistura

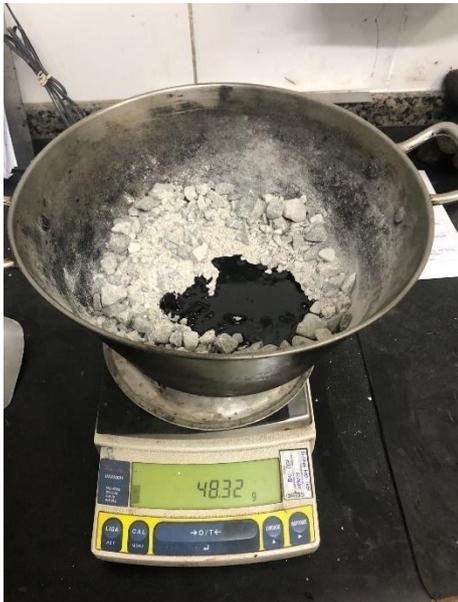


Figura 30 – Detalhe da mistura homogeneizada



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

Figura 31 - Compactação Marshall

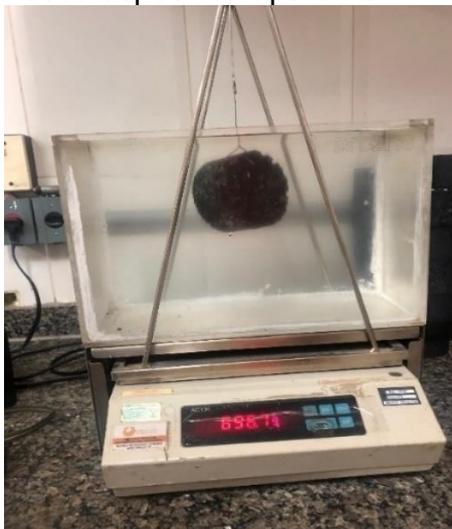


Figura 32 - Ensaio Rice Teste



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

Figura 33 - Determinação da massa específica aparente



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

3.4 Fabricação dos Corpos de Prova Prismáticos para Ensaio de Fadiga

Após a determinação do teor ótimo de ligante para a composição granulométrica definida, deu-se início a preparação e confecção dos corpos de provas prismáticos, que foram compactados individualmente utilizando o compactador por rolagem do Centro de Desenvolvimento tecnológico da Arteris. Para reprodução do volume de vazios de projeto, foi necessário aplicar uma energia de compactação de 180 passadas do rolo. Para a matriz definida, foram produzidos três corpos de prova do tipo prismático para cada projeto de mistura asfáltica, com a finalidade de se construir duas curvas de fadiga.

Os agregados foram fracionados e pesados em placas individuais, as figuras de 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48 e 49 demonstram o procedimento utilizado para obtenção das vigotas para ensaio.

Figura 34 - Agregados fracionados



Figura 35 – Pesagem dos agregados para composição da placa



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

Figura 36 – Adição do ligante asfáltico



Figura 37 - Misturadora



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

Figura 38 – Início do processo



Figura 39 – Processamento da mistura



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

Figura 40 – Mistura asfáltica homogeneizada



Figura 41 – Mistura asfáltica sendo despejada na bandeja



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

Figura 42 – Mistura asfáltica na forma de compactação



Figura 43 – Compactação através de rolagem



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

Figura 44 -Detalhe de demarcação para corte



Figura 45 – Detalhe da demarcação para corte



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

Figura 46 – Corte com serra circular



Figura 47 – Corte com serra circular



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

Figura 48 – Vigotas preparadas para ensaio



Figura 49 – Preparação do equipamento para ensaio



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios realizados com os ligantes asfálticos do tipo convencional 30/45 e modificado com polímero do tipo 60/85, dosados e ensaiados em laboratório.

4.1 Misturas Asfálticas pelo Método Marshall

Conforme os procedimentos para dosagem das misturas asfálticas descritos no Capítulo 3, os parâmetros volumétricos bem como a determinação da quantidade ideal de ligante asfáltico a ser adicionado para cada tipo de misturas asfáltica utilizada nesse estudo estão descritos conforme a seguir:

4.1.1 Mistura Asfáltica com Ligante Convencional 30/45

A tabela 7 descreve o tempo utilizado de condicionamento entre a mistura dos materiais constituintes da dosagem, bem como a temperatura e a energia de compactação. Vale chamar a atenção para o tempo de condicionamento da mistura, que tem a finalidade de simular o tempo de transporte da mistura asfáltica entre a usinagem e a aplicação.

Tabela 7 – Energia de compactação, tempo de condicionamento e temperatura
Resultados obtidos nos corpos de prova moldados e rompidos

Energia de Compactação Aplicada na MAQ (Golpes por face)	Tempo de condicionamento da mistura asfáltica antes da compactação (Horas)	Temperatura de compactação (°C)
75	2	150

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

A tabela 8 apresenta os parâmetros de massa específica aparente, densidade máxima teórica, volume de vazios, vazios do agregado mineral, vazios cheios de betume e resistência a tração por compressão diametral, obtidos conforme a variação do teor de ligante adicionado.

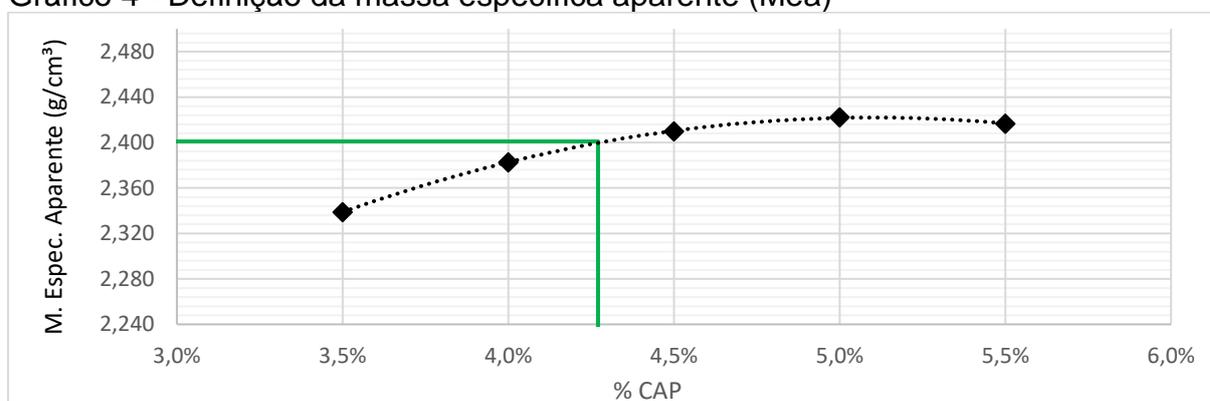
Tabela 8 – Parâmetros volumétricos e resistências

Ligante (%)	Mea compactada (g/cm ³)	DMTm Rice (g/cm ³)	Vazíos (%)	VAM (%)	VCB (%)	Resistência à Tração (Mpa)
3,5	2,339	2,517	7,1	14,4	50,8	2,07
4,0	2,383	2,498	4,6	13,2	65,1	2,55
4,5	2,410	2,479	2,8	12,7	78,0	2,49
5,0	2,422	2,460	1,5	12,7	87,9	2,38
5,5	2,416	2,442	1,0	13,4	92,2	2,15

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

No gráfico 4, podemos observar a variação da massa específica aparente da mistura compactada com o acréscimo da quantidade de ligante, esta situação é atribuída ao aumento de lubricidade da mistura asfáltica proporcionada com o acréscimo de ligante.

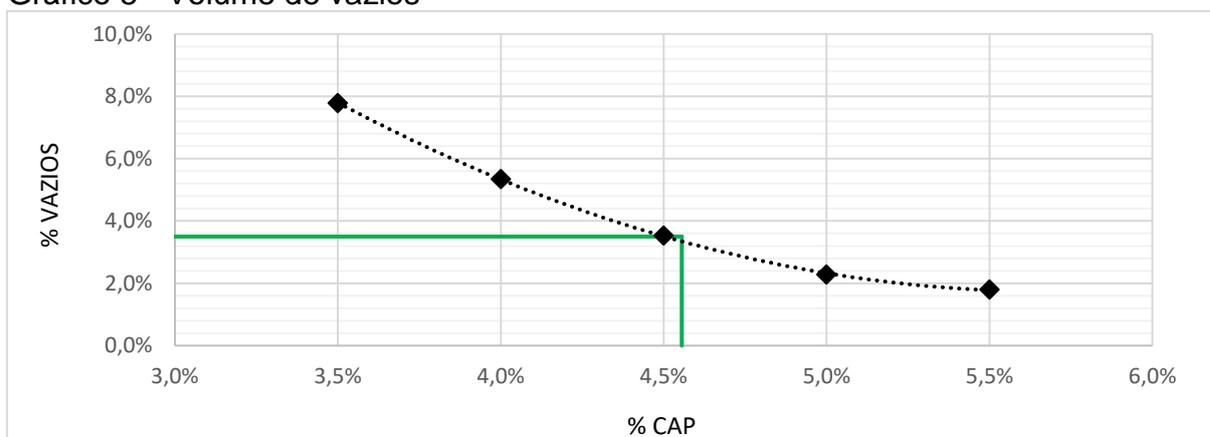
Gráfico 4 - Definição da massa específica aparente (Mea)



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

Conforme o gráfico 5, é possível evidenciar que quando aumentamos a quantidade de ligante asfáltico adicionado, obtemos redução do volume de vazios, esta situação está diretamente relacionada ao aumento de lubricidade citado no gráfico 4.

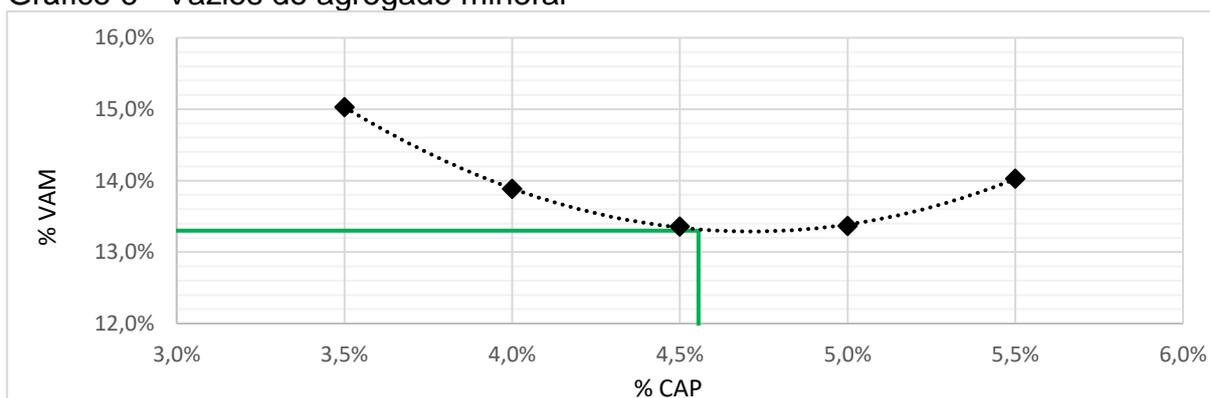
Gráfico 5 - Volume de vazios



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

O gráfico 6 apresenta a variação dos vazios do agregado mineral em percentual conforme a variação de ligante adicionado a cada ponto.

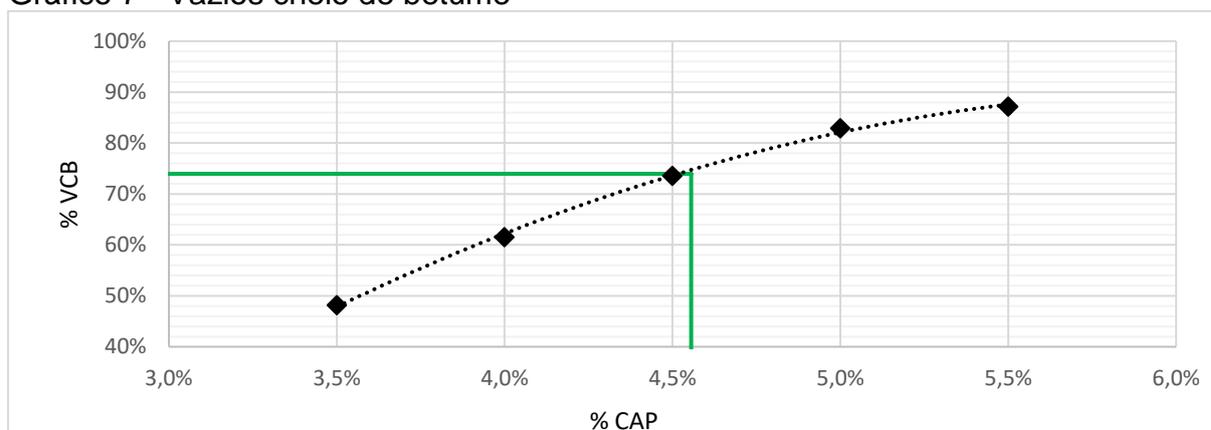
Gráfico 6 - Vazios do agregado mineral



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

O gráfico 7 demonstra a variação do percentual dos vazios cheios de betume, onde para a mistura utilizada no estudo, fixa os valores de mínimo em 65% e valor máximo de 75%.

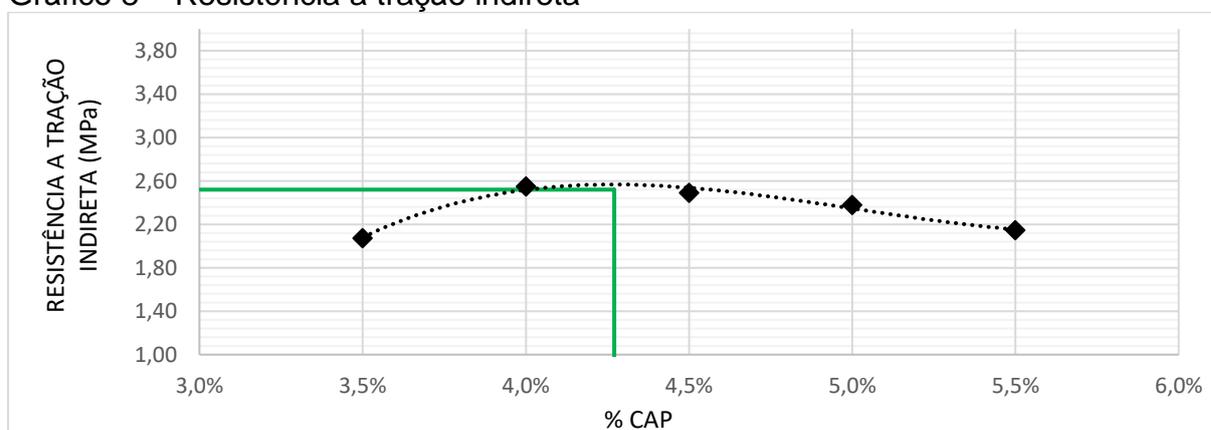
Gráfico 7 - Vazios cheio de betume



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

A resistência a tração por compressão diametral foi definida através da curva obtida no gráfico 8, onde é possível evidenciar que a resistência está relacionada a quantidade de ligante asfáltico utilizado para cada ponto, na qual a quantidade de 3,5% de ligante é insuficiente para promover uma boa coesão e a quantidade de 5,5% de ligante promove a lubricidade diminuindo a resistência da mistura conforme o ponto antecessor.

Gráfico 8 – Resistência a tração indireta



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

A tabela 9 apresenta o resumo dos parâmetros volumétricos obtidos para a mistura com ligante do tipo 30/45. Conforme podemos observar, ficou definido como 3,5% de vazios como alvo para os demais parâmetros.

Tabela 9 – Parâmetros de projeto

Ligante (%)	Mea compactada (g/cm ³)	DMTm Rice (g/cm ³)	Vazios (%)	VAM (%)	VCB (%)	Resistência à Tração (Mpa)
4,3	2,401	2,488	3,5	13,0	72,7	2,52

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

4.1.2 Mistura Asfáltica com Ligante Modificado com Polímero 60/85

A tabela descreve o tempo de condicionamento entre a mistura dos materiais constituintes da dosagem, bem como a temperatura e a energia de compactação. Vale chamar a atenção para o tempo de condicionamento da mistura, que tem a finalidade de simular o tempo de transporte da mistura asfáltica entre a usinagem e a aplicação.

Tabela 10 - Energia de compactação, tempo de condicionamento e temperatura
Resultados obtidos nos corpos de prova moldados e rompidos

Energia de Compactação Aplicada na MAQ (Golpes por face)	Tempo de condicionamento da mistura asfáltica antes da compactação (Horas)	Temperatura de compactação (°C)
75	2	165

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

A tabela 11 apresenta os parâmetros de massa específica aparente, densidade máxima teórica, volume de vazios, vazios do agregado mineral, vazios cheios de betume e resistência a tração por compressão diametral, obtidos conforme a variação do teor de ligante adicionado.

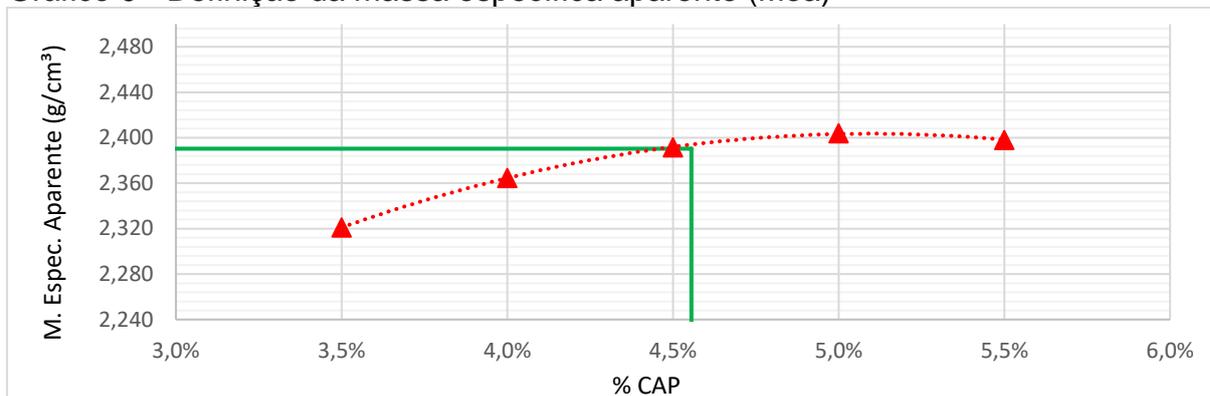
Tabela 11 - Parâmetros volumétricos e resistências

Ligante (%)	Mea compactada (g/cm ³)	DMTm Rice (g/cm ³)	Vazios (%)	VAM (%)	VCB (%)	Resistência à Tração (Mpa)
3,5	2,321	2,520	7,8	15,0	48,2	1,66
4,0	2,364	2,501	5,3	13,9	61,5	2,04
4,5	2,391	2,481	3,5	13,4	73,6	1,99
5,0	2,404	2,462	2,3	13,4	82,9	1,90
5,5	2,398	2,441	1,8	14,0	87,2	1,72

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

No gráfico 9, podemos observar a variação da massa específica aparente da mistura compactada com o acréscimo da quantidade de ligante.

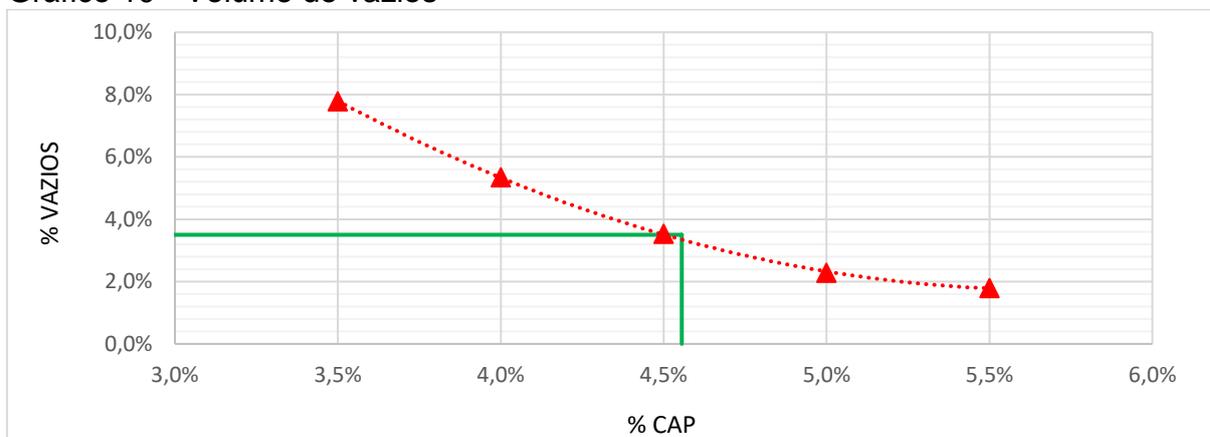
Gráfico 9 - Definição da massa específica aparente (Mea)



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

Conforme o gráfico 10, é possível evidenciar que quando aumentamos a quantidade de ligante adicionado, obtemos redução do volume de vazios.

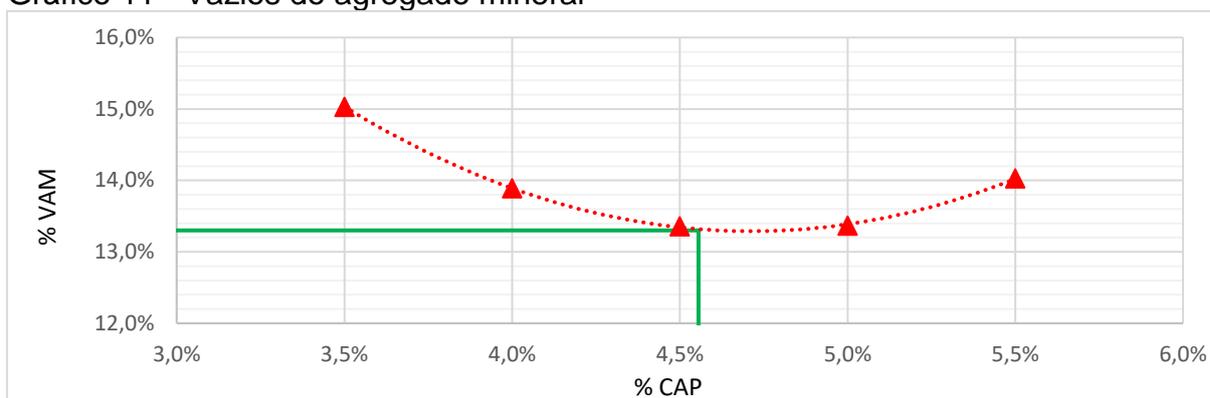
Gráfico 10 - Volume de vazios



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

O gráfico 11 apresenta a variação dos vazios do agregado mineral conforme a variação de ligante adicionado a cada ponto.

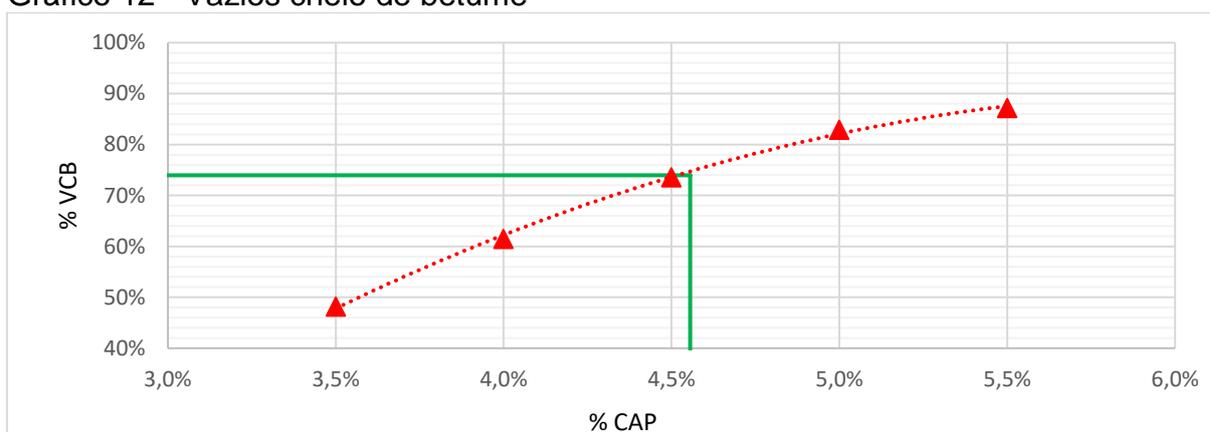
Gráfico 11 - Vazios do agregado mineral



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

O gráfico 12 demonstra a variação do percentual dos vazios cheios de betume, onde para a mistura utilizada no estudo, fixa os valores de mínimo em 65% e valor máximo de 75%.

Gráfico 12 - Vazios cheio de betume



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

A resistência a tração por compressão diametral foi definida através da curva obtida no gráfico 13.

Gráfico 13 - Resistência a tração indireta



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

A tabela 12 apresenta o resumo dos parâmetros volumétricos obtidos para a mistura com ligante modificado do tipo 60/85. Conforme podemos observar, ficou definido como 3,5% de vazios como alvo para os demais parâmetros.

Tabela 12 - Parâmetros de projeto

Ligante (%)	Mea compactada (g/cm ³)	DMTm Rice (g/cm ³)	Vazios (%)	VAM (%)	VCB (%)	Resistência à Tração (Mpa)
4,6	2,390	2,477	3,5	13,3	74,0	2,00

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

4.2 Ensaio de Fadiga a Flexão em 4 pontos

Os ensaios de fadiga à flexão foram realizados empregando o modo de carregamento com deformação controlada, onde durante o ensaio a deformação se mantém constante conforme a configuração inicial, para que isso ocorra, o equipamento varia a carga aplicada em temperatura constante de ensaio a 20°C e frequência de 10 Hz. O critério de parada utilizado foi a redução de 60% da rigidez estabelecida no quinquagésimo ciclo conforme especificado na norma da ASTM D 7460.

4.2.1 Fadiga com Ligante Convencional 30/45

A Tabela 13 demonstra os parâmetros obtidos no ensaio de fadiga utilizando o ligante convencional do tipo 30/45 com deformações controladas de 300, 400 e 500 $\mu\epsilon$ ($\mu\text{m}/\text{mm}$), os parâmetros dispostos foram obtidos no ciclo inicial que conforme parametrização fica definido no ciclo de número 50 e o final onde o módulo na flexão perde 60% da rigidez inicial. Também é possível evidenciar que devido a característica do ligante, o módulo na flexão inicial é de aproximadamente 13.000 MPa. A tabela também demonstra os demais parâmetros que são obtidos durante o ensaio.

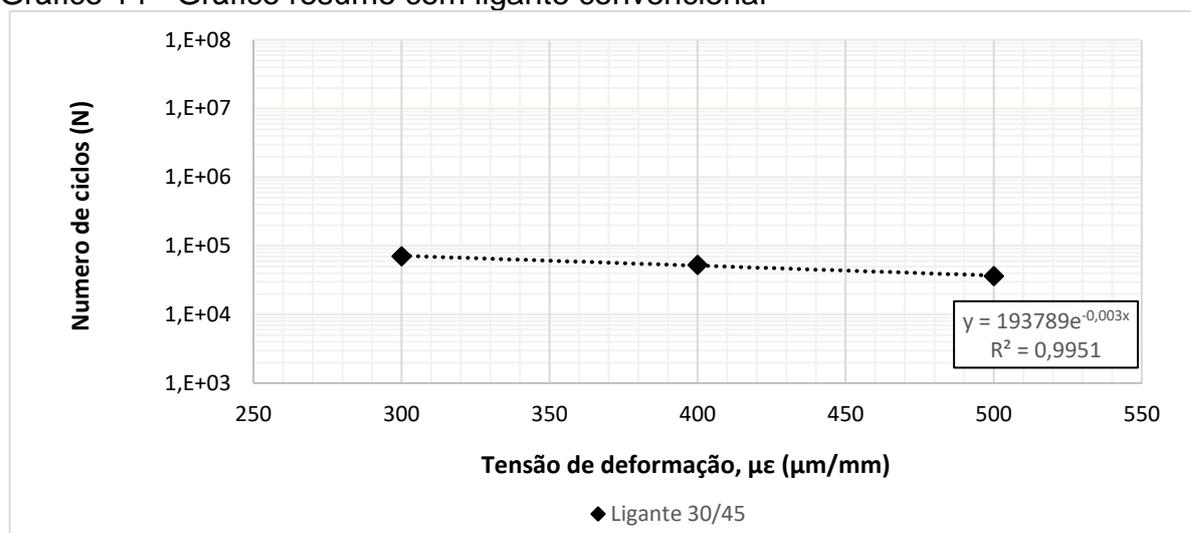
Tabela 13 Resumo dos ensaios de fadiga

Resumo dos ensaios de fadiga	CAP 30/45		CAP 30/45		CAP 30/45	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Tensão aplicada (Kpa)	3.659	1.463	5.005	2.001	6.870	2.742
Tensão de deformação, $\mu\epsilon$ ($\mu\text{m}/\text{mm}$)	300	300	399	400	500	500
Ângulo de fase (Graus)	18,9	23,3	20,7	24,4	16,3	23,4
Módulo na flexão (MPa)	12.202	4.879	12.538	5.007	13.735	5.483
Módulo elástico (MPa)	12.967	5.185	13.325	5.321	14.596	5.827
Energia dissipada (Kj/m^3)	0,259	0,15	0,505	0,292	0,718	0,466
Número de ciclos (N)	50	70.742	50	52.863	50	36.457

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

De acordo com o gráfico 14, podemos visualizar o número de ciclos obtidos para deformações controladas de 300, 400 e 500 $\mu\epsilon$ ($\mu\text{m}/\text{mm}$).

Gráfico 14 - Gráfico resumo com ligante convencional



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

4.2.2 Fadiga com Ligante Modificado 60/85

A Tabela 14 demonstra os parâmetros obtidos no ensaio de fadiga utilizando o ligante modificado do tipo 60/85 com deformações controladas de 300, 400 e 500 $\mu\epsilon$ ($\mu\text{m}/\text{mm}$), os parâmetros dispostos foram obtidos no ciclo inicial que conforme parametrização fica definido no ciclo de número 50 e o final onde o módulo na flexão perde 60% da rigidez inicial. Também é possível evidenciar que devido a característica do ligante modificado que possui menor rigidez quando comparado com o ligante convencional, o módulo na flexão inicial é de aproximadamente 9.000 MPa. A tabela também demonstra os demais parâmetros que são obtidos durante o ensaio.

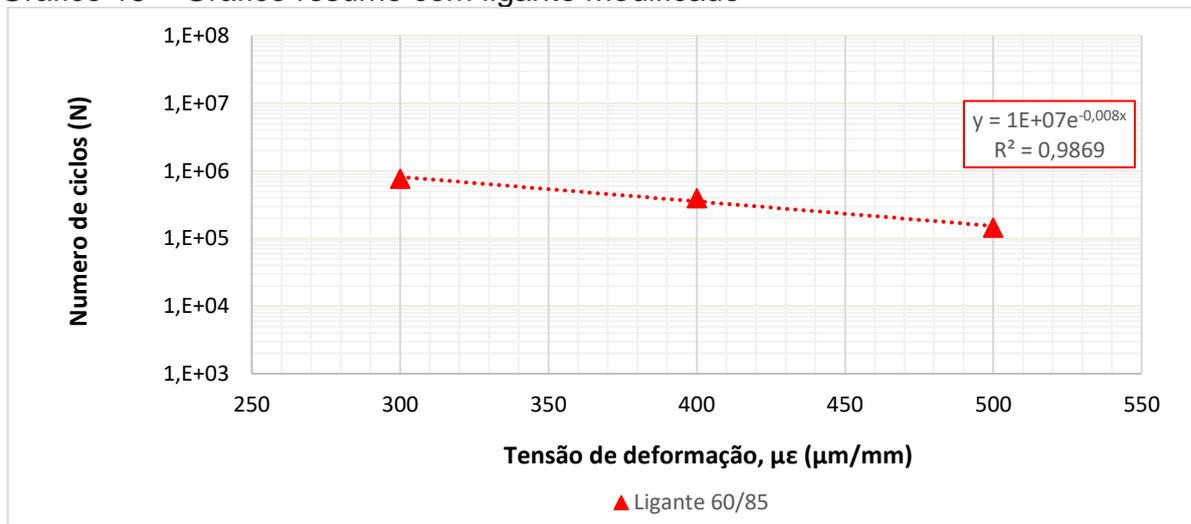
Tabela 14 – Resumo dos ensaios de fadiga

Resumo dos ensaios de fadiga	CAP 60/85		CAP 60/85		CAP 60/85	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Tensão aplicada (Kpa)	2.807	1.452	3.881	1.539	3.809	1.504
Tensão de deformação, $\mu\epsilon$ ($\mu\text{m}/\text{mm}$)	299	300	402	400	500	500
Ângulo de fase (Graus)	24,5	26,5	23,1	25,5	28,8	27,5
Módulo na flexão (MPa)	9.391	3.755	9.653	3.850	7.616	3.009
Módulo elástico (MPa)	9.981	4.556	10.282	4.101	8.113	3.206
Energia dissipada (Kj/m^3)	0,285	0,165	0,473	0,279	0,704	0,384
Número de ciclos (N)	50	772.784	50	395.986	50	145.421

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

De acordo com o gráfico 15, podemos visualizar o número de ciclos obtidos para deformações controladas de 300, 400 e 500 $\mu\epsilon$ ($\mu\text{m}/\text{mm}$).

Gráfico 15 – Gráfico resumo com ligante modificado



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

4.2.3 Resumo dos Ensaio de Fadiga

A tabela 15 evidencia um comparativo direto entre o número de ciclos necessários para que a rigidez atinja 60% da rigidez inicial, onde é possível evidenciar diretamente a capacidade do ligante asfáltico modificado comparado com o ligante asfáltico convencional de suportar as deformações impostas pelo ensaio, também é possível determinar que quanto menor a deformação adotada maior será a diferença entre as duas soluções.

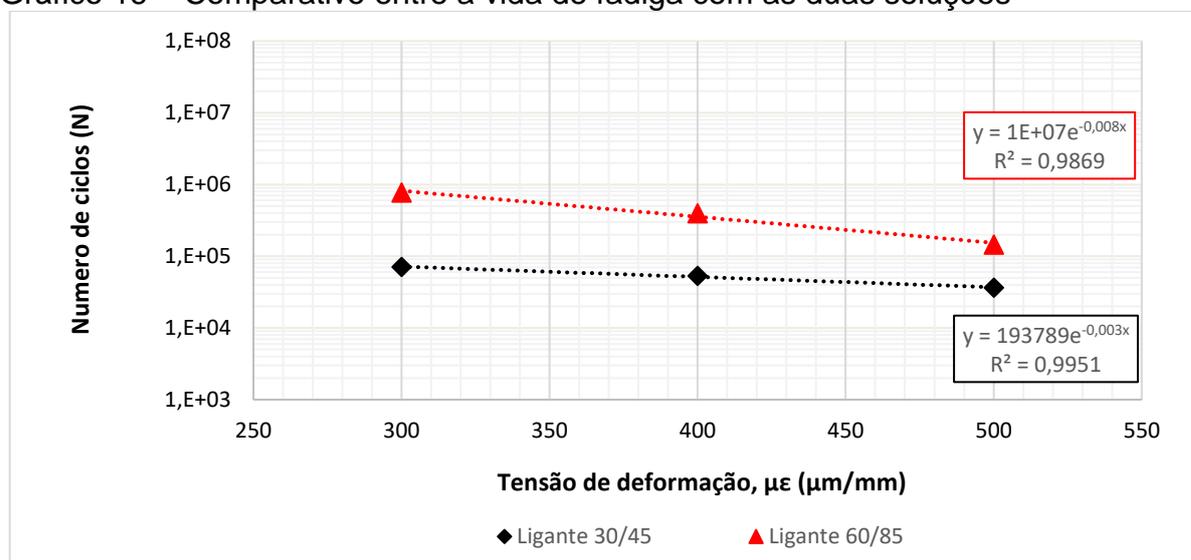
Tabela 15 – Comparativo direto entre a vida de fadiga

Ligante 30/45 - Tensão de deformação, $\mu\epsilon$ ($\mu\text{m}/\text{mm}$)	300	400	500
Número de ciclos (N)	70.742	52.863	36.457
Ligante 60/85 - Tensão de deformação, $\mu\epsilon$ ($\mu\text{m}/\text{mm}$)	300	400	500
Número de ciclos (N)	772.784	395.986	145.421
≠ Da vida de fadiga em vezes (X)	11	7	4
≠ Da vida de fadiga em vezes médio (X)	7		

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

O gráfico 16 apresenta o número de ciclos obtidos para deformações controladas de 300, 400 e 500 $\mu\epsilon$ ($\mu\text{m}/\text{mm}$) com os dois tipos de ligantes utilizados no estudo.

Gráfico 16 – Comparativo entre a vida de fadiga com as duas soluções



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2018)

4.3 Comparativo dos custos

Para compor o custo de cada tipo de mistura asfáltica, foi utilizado a composição resumida, onde foi levado em consideração o custo por metro cúbico de mistura asfáltica aplicada. Os custos foram obtidos através de uma cotação com a empresa Neovia Engenharia que presta serviços para o Grupo Arteris de concessões rodoviárias, conforme se vê na tabela 16 e 17. A tabela 18

Tabela 16 – Estimativa de Custo com ligante 30/45

Faixa C DINIT - CAP 30-45 Estimativa de custo				
Descrição	Un.	Custo Unitário (R\$)	Percentual (%)	Custo (R\$)
Brita comercial	T	35,00	94%	32,97
Cimento Asfáltico 30/45	T	3.057,37	4,3%	131,46
Filler	T	600,00	1,5%	9,00
Diversos	VB	170,00	100%	170,00
Usinagem	VB	90,00	100%	90,00
Tn- Massa (R\$)				433,44
m³ Massa (R\$)				1.061,92

Fonte: Neovia Engenharia

Tabela 17 – Estimativa de custo com ligante 60/85

Faixa C DINIT - CAP 60/85 Estimativa de custo				
Descrição	Un	Custo Unitário (R\$)	Percentual (%)	Custo (R\$)
Brita comercial	T	35,00	94%	32,97
Cimento Asfáltico	T	3.871,39	4,6%	178,08
Filler	T	600,00	1,5%	9,00
Diversos	VB	170,00	100%	170,00
Usinagem	VB	100,00	100%	100,00
Tn- Massa (R\$)				489,95
m³ Massa (R\$)				1.200,37

Fonte: Neovia Engenharia

Tabela 18 – Diferença em percentual entre os tipos de ligante utilizados

Ligante convencional - m³ - Massa (R\$)	1.061,92
Ligante modificado - m³ - Massa (R\$)	1.200,37
≠ Da solução entre ligante convencional X ligante modificado (%)	12%

Fonte: Neovia Engenharia

5 CONCLUSÃO

Os ensaios de laboratório e as análises devidamente conduzidas de acordo com materiais estudados, possibilitaram as seguintes conclusões:

- Os materiais constituintes do estudo, apresentaram características físicas em consonância às características mínimas exigidas na especificação do DNIT ES-031 para confecção de misturas asfálticas usinadas a quente.
- Com base nas dosagens realizadas em laboratório, a mistura com ligante modificado do tipo 60/85 apresentou um acréscimo de 0,3% de consumo ótimo de ligante quando comparada diretamente com a mistura asfáltica dosada com ligante convencional do tipo 30/45, este fenômeno pode ser atribuído a incorporação do polímero nos ligantes asfálticos que proporciona um aumento na viscosidade, acarretando em necessidade de consumo de ligante superior para proporcionar as mesmas características volumétricas.
- A curva de fadiga na flexão da mistura asfáltica utilizando ligante modificado do tipo 60/85 obtida em laboratório com o equipamento em 4 pontos, demonstrou na média ser superior em 7 vezes quando comparada com a mistura utilizando ligante convencional do tipo 30/45, empregando os mesmos níveis de deformação controlada.
- A tabela de composição de preços aponta que o custo da mistura asfáltica por metro cúbico aplicado com ligante convencional 30/45 é de R\$ 1.061,92 e o mesmo metro cúbico aplicado com ligante 60/85 custa R\$ 1.200,37, a diferença financeira da mistura com ligante modificado com polímero é de 12% quando comparada à mistura com ligante convencional.

Levando em consideração que o trinca por fadiga dos revestimentos asfálticos representa uma grande parcela das patologias evidenciadas em campo, a utilização de misturas asfálticas usinadas a quente com do ligante modificado na pavimentação, pode reduzir substancialmente esse tipo de defeito, visto que essa mistura apresenta uma resistência a fadiga superior quando comparada com a mistura com ligante convencional. A redução da incidência de trincas nos pavimentos, reduz significativamente a entrada da água na estrutura, impactando diretamente na resistência dos materiais que compõe o pacote do pavimento rodoviário, isso ocasiona em aumento de serventia do pavimento, reduzindo as intervenções, possibilitando a otimização dos recursos e melhorando a eficácia nas tomadas de decisões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9935. **Agregados-Terminologia**. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2005.

AASHTO T-209 (1989), **Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage**. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. 13 Edition. Washington, D. C.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7460**: Standard Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending, 2013

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E206-72**: Standard Definitions of Terms Relating to Fatigue Testing and Statistical Analysis of Fatigue Data. Philadelphia, 1979.

ASPHALT INSTITUTE; **Asphalt Binder Testing**. MS-25, 1ª edição, EUA, 2007.

BALBO, José Tadeu, **Pavimentação Asfáltica: Materiais, projetos e restauração**. Oficina de Textos, 2007.

BARRA, Breno Salgado, **Avaliação da Ação da Água no Módulo Complexo e na Fadiga de Misturas Asfálticas Densas**. Florianópolis, 2009, volume único, 327 p.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J. B.; **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. PETROBRAS: Abeda, 504p., 2006

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de rodovias 2017: relatório gerencial**. Ed. Brasília: CNT: SEST : SENAT, 2017.

COLPO, Gracieli Bordin. **Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas Através do Ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos** / Gracieli Bordin Colpo 2014. 154 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. MEDINA, J. & MOTTA, L. G. (2005). **Mecânica dos Pavimentos**. 2a. Edição.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, DNER. **Manual de Pavimentação**, 2 ed. Rio de Janeiro, 320p., 1996.

DI BENEDETTO, H.; DE LA ROCHE, C.; BAAJ, H.; PRONK, A.; LUNDSTRÖM, R. **Fatigue of Bituminous Mixtures**. Materials and Structures, v. 37, p. 202-216, apr. 2004.

DNER-ME 117/98 (1998), **Misturas Betuminosas a Quente: Determinação da densidade aparente**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro (RJ).

DNER-ME 35/98 (1998), **Agregados- Determinação da Abrasão Los Angeles**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro (RJ).

DNER-ME 54/98 (1998), **Agregados – Equivalente de Areia**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro (RJ).

DNER-ME 83/98 (1998), **Agregados- Análise Granulométrica**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro (RJ).

DNER-ME 86/94 (1994), **Agregados- Determinação do Índice de Forma**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro (RJ).

DNER-ME 89/98 (1998), **Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro (RJ).

DNIT (2006), **Manual de Pavimentação**. 3ª Edição, editado pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Ministério dos Transportes (MT). Rio de Janeiro, Brasil.

DNIT-ES 031/06 (2006), **Pavimentos Flexíveis: concreto asfáltico (Faixa C do DNIT)**. Departamento Nacional de Estradas de Ro. Rio de Janeiro (RJ).

European Committee for Standardization, ECS. En 12597: **Bitumen and bituminous binders terminology**. Bruxelas, European Committee for standardization, 2000.

FONTES, Liseane Padilha Thives da Luz. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade do Minho, Portugal, 2009.

Gontijo, P. R. A. "Reologia, Propriedades Viscoelásticas Lineares e Conceito de Módulo de Rigidez de Betumes Puros e de Misturas Betuminosas—Método de Cálculo." *5º Encontro de Asfalto, IBP* (1980).

<http://www.dnit.gov.br/sistema-nacional-de-viacao/sistema-nacional-de-viacao>

Instituto Brasileiro de Petróleo, **IBP; Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos**. Comissão de asfalto, Rio de Janeiro, 6ª edição revista, 1999.

LEITE, L.F.M. **Estudo de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros**. 1999. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

LOUREIRO, T. G. **Estudo da Evolução do Dano por Fadiga em Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

MELLO, L. G. R. **O Estudo do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

Mothé, Michelle Gonçalves. **Estudo do comportamento de ligantes asfálticos por reologia e análise térmica** / Michelle Gonçalves Mothé. Rio de Janeiro, 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Escola de Química, Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos – EQ, 2009.

Motta, L.M.G. & Leite, L.F.M., 1991. **Efeito do Filer nas Características Mecânicas das Misturas Asfálticas**. Anais do 11º Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte. Gramado, Rio Grande do Sul, Brasil.

PINTO, S. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

PREUSSLER, E.S. & Pinto, S., 2001. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis**. Editora Copiarte. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PREUSSLER, E.S., 1983, **Estudo da Deformação Resiliente de Pavimentos Flexíveis e Aplicação ao Projeto de Camadas de Reforço**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ.

RAMALHO, A. V. F. **Uma análise dos benefícios com a utilização do asfalto borracha nas rodovias do Brasil**. São Paulo, SP, 2009.

RODRIGUES, R. M. **Estudo do trincamento dos pavimentos**. Rio de Janeiro. Tese de Doutorado em Engenharia – COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 208p. 2005.

SANTANA, H. **Manual de Pré-Misturados a Frio**. IBP/ Comissão de Asfalto. Rio de Janeiro, RJ, 1993.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual técnico de pavimentação: volume 1**. 2ª ed. São Paulo: Pini, 2007.

SHRP, 1993. SHRP – P – 338, **Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Project**. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C., USA.