



ANÁLISE DA VIDA DE FADIGA DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS EM DIFERENTES MISTURAS

Mieka Arao

Projeto de Graduação apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Escola
Politécnica, Universidade Federal do Rio
de Janeiro, como parte os requisitos
necessários à obtenção do título de
Engenheiro.

Orientadora: Sandra Oda

Rio de Janeiro

Março/2014

ANÁLISE DA VIDA DE FADIGA DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS EM
DIFERENTES MISTURAS

Mieka Arao

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinada por:

Prof. Dr^a. Sandra Oda

Prof. Dr. Giovani Manso Ávila

Eng. Leonardo Santana Cavalcanti

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

Março de 2014

Arao, Mieka

Análise da Vida de Fadiga de Pavimentos Flexíveis em Diferentes Misturas/ Mieka Arao – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2014.

Orientador: Sandra Oda

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 48-49

1.Introdução 2. Principais Tipos de Defeitos em Pavimentos Flexíveis 3. Fadiga nas Misturas Asfálticas 4. Materiais e Métodos 5. Resultados e Análise de Resultados 6. Conclusões 7. Referências Bibliográficas

AGRADECIMENTOS

À Professora e orientadora Sandra Oda, que contribuiu e aconselhou com muita paciência e dedicação desde a época em que fui bolsista de Iniciação Científica. Obrigada por todo conhecimento que me passou durante esses quatro anos.

À Asfálticos Consultoria, que forneceu os dados dos ensaios e patrocinou todas as visitas que fiz na CCR Nova Dutra e, também, aos seus funcionários que sempre me tratam com muito carinho.

À CCR Nova Dutra, que me acolheu com muita simpatia nas visitas que fiz durante o meu estágio na Asfálticos Consultoria e me tratou sempre como parte da equipe.

Aos meus pais, Luiza e Seiiti, por sempre me apoiarem e por me ensinarem todos os dias a ser uma pessoa melhor. E, também, à minha irmã Lina, que sempre foi meu exemplo.

Às minhas amigas que me acompanham desde a época do CSA: Juliana Fontes, Juliana Paixão, Laís, Maria Lívia, Pamela e Silje. Obrigada por estarem sempre ao meu lado, fazendo com que os momentos mais tensos se tornassem sempre mais leves.

Ao Aloízio, que mesmo tendo me acompanhado somente nos últimos meses de faculdade, me motivou todo o tempo e me incentivou nessa reta final tão importante.

Por fim, agradeço aos meus amigos que conheci na UFRJ e que fizeram essa trajetória ser mais divertida e feliz.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Análise da Vida de Fadiga de Pavimentos Flexíveis em Diferentes Misturas

Mieka Arao

Março/2014

Orientadora: Sandra Oda

Curso: Engenharia Civil

A camada superficial de pavimentos flexíveis, composta por uma mistura de ligante e agregados, tem uma importância funcional, que promove conforto e segurança dos usuários de uma via. Portanto, é necessário que ela esteja em bom estado de conservação. Os defeitos mais comuns em um revestimento asfáltico são as trincas por fadiga e as deformações permanentes em trilhas de rodas. Os primeiros são relacionados às cargas repetidas de tráfego e, também, pela elasticidade da mistura. Os segundos desenvolvem-se gradualmente com o aumento de solicitações de cargas por eixo. Para a determinação da vida de fadiga, são feitas análises em laboratórios, como o ensaio convencional de velocidade controlada.

O presente trabalho visa determinar a vida de fadiga em diferentes misturas, utilizando um equipamento novo no Brasil e ainda pouco utilizado no mundo, o *Four Point Bending Apparatus*. Ele utiliza a flexão em quatro pontos em vigas prismáticas e é conduzido à deformação e à tensão controlada. Foram ensaiadas e analisadas 19 misturas, com faixas granulométricas, ligantes e agregados mais utilizados na CCR Nova Dutra.

Foi constatado que as misturas com asfalto borracha possuíram o melhor comportamento quanto a vida de fadiga e as misturas com CAP 30/45 apresentaram os piores resultados. As misturas com outros ligantes variaram o comportamento de acordo com o tipo de agregado utilizado e, também, com a deformação imposta no ensaio.

Palavras-Chave: Pavimentos Flexíveis, Defeitos em Pavimentos Flexíveis, Vida de Fadiga, Ensaio de flexão em quatro pontos.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Fatigue Life Analysis of Flexible Pavements in Different Mixtures

Mieka Arao

March/2014

Advisor: Sandra Oda

Course: Civil Engineering

The surface layer of flexible pavements, which is made by a mixture of asphalt, aggregates and voids, has a functional importance, that gives comfort and safety of users of a road. So, it's necessary that the surface layer be in good condition. The most ordinary defects in a bituminous mixture are fatigue cracking and permanent deformation. For the determination of fatigue life, laboratory analysis are done, for example, there are the conventional speed-controlled trial.

This work aims to determine the fatigue life in different mixtures, using the equipment Four Point Bending Apparatus, still a new technology in the entire world. It uses the four-point bending in prismatic beams and with controlled strain. There were assayed and analyzed 19 mixtures with materials currently used by the enterprise CCR Nova Dutra.

It has been found that mixtures with asphalt rubber had the longest fatigue life and the mixtures with CAP 30/45 had the worst results. The mixtures with others kinds of asphalts changed the behavior according to the type of aggregate used and also to the deformation imposed on the test.

Key-Words: Flexible Pavements, Defects in Flexible Pavements, Fatigue Life, Four-point bending test

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo.....	2
1.2. Justificativa.....	3
2. PRINCIPAIS TIPOS DE DEFEITOS EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	4
2.1. Deformação Permanente na Trilhas de Rodas.....	5
2.2. Trincas nos Revestimentos Asfálticos.....	6
3. FADIGA NAS MISTURAS ASFÁLTICAS	9
3.1. Ensaio de Fadiga Convencional.....	11
3.2. Ensaio de Fadiga com <i>Four Point Bending Apparatus</i>	16
3.2.1. Equipamento de Fadiga de Viga Apoiada em Quatro Pontos.....	17
4. MATERIAIS E MÉTODOS	20
4.1. Materiais.....	21
4.1.1. Caracterização dos Ligantes.....	21
4.1.2. Caracterização dos Agregados.....	22
4.2. Misturas Asfálticas.....	23
4.3. Método de Ensaio – Fadiga de Viga em Quatro Pontos.....	28
4.3.1. Moldagem dos Corpos de Prova.....	31
4.3.2. Execução do Ensaio de Fadiga de Viga de Quatro Pontos.....	37
4.3.2.1. Operação do equipamento.....	37
5. RESULTADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS	38
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	47
6.1. Considerações Finais.....	47
6.2. Sugestão de Trabalhos Futuros.....	47
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

ÍNDICE DE TABELAS

Tab. 1 – Combinação de Materiais.....	21
Tab. 2 – Resultados da Caracterização dos Ligantes.....	21
Tab. 3 – Resultados dos Ensaios de Caracterização dos Agregados.....	22
Tab. 4 – Limites das faixas densas adotadas.....	23
Tab. 5 – Limites das faixas descontínuas.....	24
Tab. 6 – Identificação das misturas em função dos materiais utilizados e da faixa granulométrica.....	25
Tab. 7 – Identificação das misturas conforme os materiais constituintes.....	26
Tab. 8 – Parâmetros de dosagem das misturas com agregados oriundos da pedreira Pombal.....	27
Tab. 9 – Parâmetros de dosagem das misturas com agregados oriundos da pedreira Jambeiro.....	27
Tab. 10 – Resultados dos ensaios de fadiga em quatro pontos das misturas da Faixa III DERSA JBR.....	38
Tab. 11 – Resultados dos ensaios de fadiga em quatro pontos das misturas da Faixa III DERSA PBL.....	39
Tab. 12 - Resultados dos ensaios de fadiga em quatro pontos das misturas GAP GRADED JBR.....	39
Tab. 13 - Resultados dos ensaios de fadiga em quatro pontos das misturas GAP GRADED PBL.....	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Deformação Permanente nas Trilhas de Roda.....	6
Fig. 2 – Trincas Isoladas.....	7
Fig. 3 – Trincas Interligadas.....	8
Fig. 4 – Estágios em um Processo de Fadiga.....	9
Fig. 5 – Ensaio Tradicional de Vida de Fadiga por Compressão Diametral.....	11
Fig. 6 – Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos.....	12
Fig. 7 – Flexão de Corpos de Prova Trapezoidais.....	12
Fig. 8- Flexão de Barras Prismáticas de Vigas.....	12
Fig. 9 – Vida de fadiga considerando diferentes faixas granulométricas.....	13
Fig. 10 – Representação das tensões no centro da amostra de um CP cilíndrico.....	13
Fig. 11a – Equipamento Hidráulico e de Aquisição de Dados.....	16
Fig. 11b – Dispositivo para Ensaio de Flexão em Quatro Pontos na Câmara de Controle de Temperatura.....	16
Fig. 12 – Representação no carregamento aplicado.....	16
Fig. 13 – Câmara Ambiental.....	18
Fig. 14 – Reservatório Pneumático.....	18
Fig. 15 – Equipamento de fadiga.....	18
Fig. 16 – Controlador IMACS.....	19
Fig. 17 – Software UTC.....	19
Fig. 18 – Curvas granulométricas das faixas densas utilizadas nesta pesquisa.....	24
Fig. 19 – Limites inferior e superior da faixa descontínua.....	25
Fig. 20 – Diagrama de Esforços na Viga.....	28
Fig. 21 – Equipamento PResBOX.....	31
Fig. 22- Tela do Software Utilizado na Calibração do Equipamento PResBOX.....	31
Fig. 23 – Molde do Prisma.....	32
Fig. 24 – Inserção da base do molde e da placa de metal.....	32
Fig. 25 - Inserção do quarteador.....	32
Fig. 26 – Massa dentro do molde com o quarteador.....	32
Fig. 27 – Regularização da mistura.....	32
Fig. 28a e 28b – Inserção da placa de metal.....	33

Fig. 29a e 29b – Colocação do molde no PResBOX.....	33
Fig. 30 – Tela do Software com os botões “Locked” e “Centered”	34
Fig. 31 – Bloco extraído após a moldagem.....	34
Fig. 32 – Equipamento Autosaw.....	35
Fig. 33a e 33b – Serragem do prisma em dois pedaços iguais.....	35
Fig. 33c – Prisma serrado.....	35
Fig. 34a e 34b – Serragem da metade do prisma.....	36
Fig. 34c – Prisma serrado.....	36
Fig. 35a e 35b – Serragem da vigota para que fique em dimensões adequadas.....	36
Fig. 35c – Vigotas serradas.....	36
Fig. 36 – Curvas de fadiga e respectivos modelos gerados após ensaios de fadiga em quatro pontos das misturas da Faixa III DERSA, P21, P22, P23 e P24 com agregados da pedreira Jambeiro.....	41
Fig. 37 - Curvas de fadiga e respectivos modelos gerados após ensaios de fadiga em quatro pontos das misturas da Faixa III DERSA, P09, P10, P11 e P12 com agregados da pedreira Pombal.....	42
Fig. 38 - Curvas de fadiga e respectivos modelos gerados após ensaios de fadiga em quatro pontos das misturas GAP GRADED, P29, P30, P31 e P32 com agregados da pedreira Jambeiro.....	42
Fig. 39 - Curvas de fadiga e respectivos modelos gerados após ensaios de fadiga em quatro pontos das misturas GAP GRADED, P25, P26, P27 e P28 com agregados da pedreira Pombal.....	43
Fig. 40 – Média da rigidez à flexão a 20°C e 10 Hz das misturas da Faixa III DERSA, P21, P22, P23 e P24 com agregados da pedreira Jambeiro.....	45
Fig. 41 – Média da rigidez à flexão a 20°C e 10 Hz das misturas da Faixa III DERSA, P09, P10, P11 e P12 com agregados da pedreira Pombal.....	45
Fig. 42 – Média da rigidez à flexão a 20°C e 10 Hz das misturas GAP GRADED, P29, P30, P31 e P32 com agregados da pedreira Jambeiro.....	46
Fig. 43 – Média da rigidez à flexão a 20°C e 10 Hz das misturas GAP GRADED, P25, P26, P27 e P28 com agregados da pedreira Pombal.....	46

1. INTRODUÇÃO

A pavimentação visa a melhoria operacional do tráfego, pois é criada uma superfície mais regular, aderente e menos ruidosa. Com uma qualidade de rolamento adequada, os custos operacionais diminuem, já que eles estão diretamente associados às condições de rolamento. A regularidade também proporciona um deslocamento em maiores velocidades, o que representa economia em tempos de viagem.

Além disso, as estruturas do pavimento tem como requisito mais importante o suporte de esforços oriundos de cargas e de ações climáticas. Portanto, dimensiona-se um pavimento em relação ao tráfego e condições ambientais, levando em consideração as questões econômicas e disponibilidade de materiais.

As estruturas dos pavimentos são formadas por camadas de espessura finita, apoiadas a uma fundação, chamada subleito. Elas têm como objetivo proporcionar o suporte do tráfego e fornecer segurança, conforto e economia. Para tanto, é necessário que o pavimento possua qualidade funcional, que está relacionada com a qualidade da superfície de rolamento.

Nos pavimentos flexíveis, o revestimento é composto de uma combinação entre ligante asfáltico e agregado mineral, compondo a mistura asfáltica. O desempenho dessa camada depende das propriedades de seus materiais individualmente e, também, da relação entre ligante e agregado.

O ligante asfáltico possui comportamento bem variado quando submetido a diferentes temperaturas, o que pode causar problemas no pavimento. Os principais defeitos são as trincas por fadiga do revestimento e o acúmulo plástico das deformações permanentes nas trilhas de roda.

As trincas por fadiga estão ligadas às cargas repetidas de tráfego e pela rigidez do ligante asfáltico, que não suporta as solicitações do tráfego pesado sem trincar. Já a deformação permanente nas trilhas de roda, ocorre devido à densificação dos materiais ou ruptura por cisalhamento, que depende principalmente da estrutura de agregados e também das características de rigidez do ligante asfáltico.

Para permitir uma previsão da vida útil em relação à fadiga, são necessárias simulações técnicas e da análise econômica em laboratório. Para isso, existem alguns métodos para

a determinação desse parâmetro. Os ensaios em laboratórios são feitos com cargas repetidas com diferentes níveis de tensão ou deformação até atingir a ruptura. Eles visam reproduzir as condições do revestimento asfáltico no campo. Podem ser realizados ensaios com tensão controlada ou deformação controlada (FONTES, 2009).

No Brasil, o ensaio mais utilizado é feito por compressão diametral à deformação controlada e são aplicadas cargas até a ruptura do corpo de prova e é sugerido para revestimentos mais espessos. Além dele, existe o ensaio de flexão de quatro pontos em vigas prismáticas e é realizado à deformação controlada.

1.1 OBJETIVO

Objetivo desse trabalho é obter os parâmetros que permitam a previsão da vida de fadiga de revestimentos asfálticos, de modo a possibilitar uma escolha apropriada, com base em simulações técnicas e da análise econômica em laboratório, da mistura mais adequada para determinada obra.

As atividades feitas para a execução desse trabalho são:

- Caracterização dos materiais, como os ligantes e os agregados;
- Dosagem das misturas asfálticas;
- Avaliação da resistência à fadiga das misturas asfálticas, com a utilização do equipamento Four Point Bending Apparatus;
- Comparação entre os diferentes materiais empregados;
- Identificação dos principais parâmetros de fadiga;
- Conclusões.

Os ensaios foram realizados na sede da CCR Nova Dutra e os resultados dos mesmos foram cedidos pela empresa e pela Asfálticos Consultoria, onde a autora do presente trabalho fez seu estágio durante um ano.

1.2 JUSTIFICATIVA

O sistema rodoviário é o principal sistema de transporte no Brasil, o que representa uma movimentação de cerca de 60% de todas as cargas no país e mais de 90% de circulação de passageiros em território brasileiro (CNT, 2012). Porém, os investimentos nesse sistema são baixos: apenas 12% da malha rodoviária brasileira é pavimentada (DNIT, 2012).

Em 2011, quase R\$ 5 bilhões foram destinados à manutenção de vias já existentes, enquanto que R\$ 3 bilhões foram investidos em construção de novas rodovias (CNT, 2012). Para que essa grande diferença diminua, é necessária a realização de estudos, que buscam, principalmente, a melhoria do revestimento asfáltico, procurando a melhor combinação de materiais disponíveis.

Um dos principais problemas no revestimento asfáltico é a falta de uma correspondência direta entre a resistência ao trincamento por fadiga que a camada apresentará em campo e os parâmetros obtidos através da caracterização de ligantes e dosagem de misturas asfálticas, prejudicando, assim, uma tomada de decisões apropriada nos projetos de pavimentos novos. Essa lacuna só poderá ser suprida através da comparação de diversos resultados de ensaios de fadiga em diversos materiais, realizada através de métodos mecânicos.

Os métodos mecanicistas de dimensionamento de reforço de pavimentos consideram a fadiga da camada asfáltica como um dos critérios de ruptura. Para isso, devem ser realizadas análises das tensões e das deformações no sistema de multicamadas elásticas e isotrópicas, através de comparações entre os resultados obtidos com as solicitações e as deformações admissíveis que os materiais são capazes de resistir. No entanto, vale ressaltar que isso só se torna possível através do uso de modelos de fadiga das misturas (FONTES, 2009).

2. PRINCIPAIS TIPOS DE DEFEITOS EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

As rodovias e estradas representam um patrimônio de um país, já que diminuindo a sua produtividade, afeta a economia nacional. Por isso, é de grande importância que se preserve e prolongue a vida útil de um pavimento. O aparecimento de degradações em pavimentos flexíveis diminui a sua qualidade. Portanto, a detecção desses defeitos em estágios iniciais e a determinação de suas causas são muito importante para uma tomada de decisões mais efetiva para que se mantenha a qualidade funcional e estrutural do pavimento durante o período para que foi projetado (FONTES, 2009).

As condições ambientais, capacidade do suporte do pavimento e do subleito, a qualidade dos materiais empregados e do processo construtivo, volume de tráfego e a carga por eixo do caminhão são os fatores que variam a velocidade de deterioração de um pavimento (FONTES, 2009).

Existem manuais de identificação e classificação de defeitos para cada país. Esses catálogos são documentos de referência que possuem, para cada tipo de pavimento e de defeito, a sua descrição, níveis de severidade e modo de medição aplicável. Para cada defeito são apresentados fotos e exemplos de pavimentos com as mesmas características de degradação. Um bom exemplo desses documentos é o catálogo de degradações desenvolvido pelo programa *Strategic Highway Research Program (SHRP)* em 1993 (FONTES, 2009).

No Brasil, o catálogo que define os termos técnicos da classificação de defeitos nos pavimentos flexíveis é a Norma DNIT – TER 005 (2003), Defeitos nos Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos – Terminologia. Esta Norma apresenta anexos com quadro de resumos dos defeitos, sua codificação e classificação, a representação das degradações e suas respectivas fotografias.

Os defeitos mais frequentes nas estradas brasileiras são o aparecimento de deformações permanentes na trilhas de rodas e o desenvolvimento de trincas no revestimento asfáltico (DNIT, 2006).

2.1 Deformação Permanente nas Trilhas de Rodas

A ação de cargas de tráfego em pavimentos flexíveis provoca deformações permanentes ou reversíveis. As primeiras permanecem mesmo após cessar a aplicação da carga no pavimento, isto é, possui um caráter residual (PREUSSLER & PINTO, 2001 *apud*. FONTES, 2009).

O desenvolvimento das deformações permanentes se caracteriza no aumento da sua profundidade e no aparecimento de outros tipos de defeitos (Figura 1). Em alguns casos, podem surgir cordões laterais longitudinais de mistura asfáltica da camada de desgaste, devido à fluência do material. As deformações desenvolvem-se gradualmente com o aumento das solicitações de cargas por eixo e aparecem como depressões longitudinais nas trilhas de roda, podendo ou não possuírem elevações laterais nas estradas (FONTES, 2009).

A irregularidade do pavimento devido às variações longitudinais causadas pelas deformações permanentes, originam os seguintes problemas: a diminuição da segurança, aumento do desconforto dos usuários e aumento do custo operacional dos veículos (GOUVEIA, 2002 *apud*. FONTES, 2009).

As depressões também preocupam porque as deformações, em superfícies impermeáveis, com profundidade maiores que 5 mm podem causar aquaplanagem e, também, essas depressões dificultam a manutenção da direção do veículo e proporcionam uma maior insegurança na via (FONTES, 2009).

O fenômeno da deformação permanente é um processo complexo, pois ele é influenciado pelas propriedades e proporções de cada um dos componentes de uma mistura asfáltica (agregados, ligante e volume de vazios). A deformação permanente acontece com mais frequência no verão, já que a altas temperaturas a viscosidade do ligante diminui e o carregamento do tráfego é suportado pelo agregado mineral. A resistência à deformação permanente é considerada como uma combinação de resistência do ligante e do agregado mineral (FONTES, 2009).

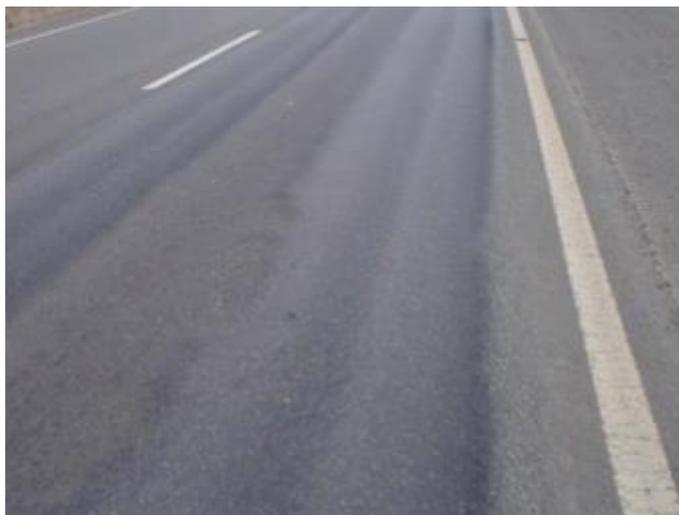


Figura 1 - Deformação Permanente nas Trilhas de Roda (FONTES, 2009)

2.2 Trincas no Revestimento Asfáltico

As trincas no revestimento asfáltico são os defeitos mais comuns nos pavimentos flexíveis. A maior parte das trincas é causada pelo fenômeno de fadiga, ou seja, devido às ações repetidas de esforços de tração por flexão dessa camada. Elas são o primeiro sinal da redução da qualidade estrutural do pavimento (FONTES, 2009).

As trincas por fadiga iniciam-se na parte inferior da camada asfáltica e propagam-se até a superfície do pavimento. Normalmente, elas surgem nas trilhas de roda de veículos pesados na direção longitudinal da via (Figura 2). Seu estágio final caracteriza-se por trincas do tipo pele de crocodilo (Figura 3), já que as trincas longitudinais isoladas evoluem para trincas ramificadas. Também podem aparecer trincas transversais, que são originadas pelas trincas ramificadas. As trincas parabólicas à superfície do pavimento são causadas por problemas de estabilidade dos materiais das camadas de desgaste associados ao tráfego pesado ou pela ligação deficiente entre a dessa camada com a inferior (FONTES, 2009).

O envelhecimento dos ligantes depende do tipo e qualidade do ligante, das condições climáticas e da mistura (a elevada quantidade de asfalto e um pequeno volume de vazios dificultam o processo de oxidação, o que aumenta a durabilidade do material). As trincas causadas pelo envelhecimento são irregulares, com espaçamento maior do que 0,5mm (DNIT, 2006 *apud*. FONTES, 2009).

O retraimento das misturas asfálticas, causadas pela variação de temperatura, também pode ocasionar trincas em pavimentos flexíveis. Esse fenômeno ocorre com a grande diminuição das temperaturas, por isso não ocorre muito no Brasil.

As trincas por propagação ocorrem quando as trincas na camada inferior se propagam para a camada mais superficial. Elas se apresentam, portanto, sob forma longitudinal, irregular ou interligada. Essa propagação é consequência da concentração de tensões entorno da região da trinca, o que faz com que a vida de fadiga da camada superficial seja drasticamente reduzida (FONTES, 2009).

Nos pavimentos também podem ser desenvolvidos trincas a partir da superfície da camada de rolamento, que se propagam para as camadas inferiores. Elas são resultado da grande concentração de tensões verticais no contato pneu-pavimento, causando esforços de corte nessa área (MOLENAAR & POTTER, 1997 *apud*. FONTES, 2009). Esse tipo de trinca é influenciado por pavimentos com camadas superficiais muito elevadas e locais onde há muita exposição solar (FREITAS, 2004 *apud*. FONTES, 2009). O aparecimento de fendas originadas na superfície de rolamento é um fenômeno que deve ser evitado, já que causam graves problemas, como a progressiva degradação, entrada de água na estrutura do pavimento, o desconforto dos usuários e a redução de segurança (VANELSTRAETE & DE BONDT, 1997 *apud*. FONTES, 2009).



Figura 2 - Trincas Isoladas (FONTES, 2009)



Figura 3 - Trincas Interligadas (FONTES, 2009)

3. FADIGA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

As camadas asfálticas são submetidas a carregamentos de curtos intervalos de tempo pelos veículos que circulam sobre os pavimentos. Essas cargas acabam causando degradações que resultam na perda de rigidez do material e, conseqüentemente, por repetição, conduzem o fenômeno de fadiga (DI BENEDETTO e DE LA ROCHE, 1998). A fadiga ocorre por meio de ações mecânicas e/ou térmicas que afetam a vida útil do material. Segundo a ASTM (1979), o fenômeno de fadiga é “o processo da mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis que produzem as fissuras que conduzem para totalizar a falha após um determinado número de ciclos”.

No processo de fadiga de uma estrutura sujeita a um carregamento cíclico, são identificados diversos estados, conforme ilustra a Figura 4 (FONTES, 2009)

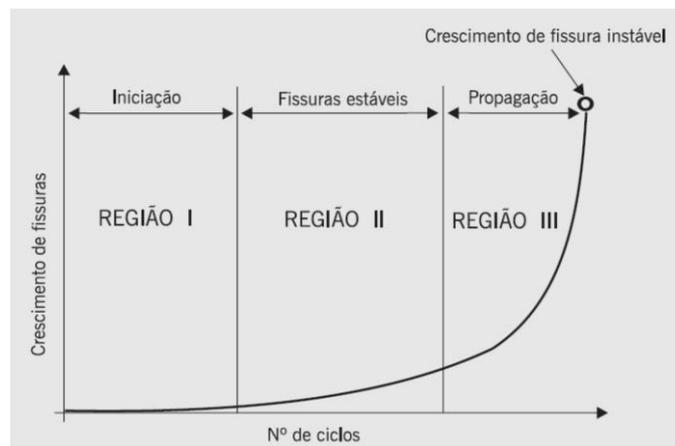


Figura 4 - Estágios em um Processo de Fadiga (FONTES, 2009)

Na Região I, ocorrem as primeiras mudanças microestruturais; aparecem microfissuras; a densidade do deslocamento cresce e as zonas de danos irreversíveis se iniciam. Já a Região II é caracterizada pelas macrofissuras que surgem da coalescência das microfissuras. E, por fim, na Região III ocorre o crescimento das macrofissuras conduzindo rapidamente ao colapso total.

A vida de fadiga pode ser definida em termos de vida de fratura (N_f), que se refere ao número total de aplicações de uma certa carga necessárias à fratura completa da amostra, ou vida de serviço (N_S), que é associado ao número total de aplicações dessa mesma carga que reduz o desempenho ou a rigidez inicial da amostra a um nível pré-estabelecido (FONTES, 2009).

As leis de fadiga, que são consideradas como a relação entre o estado de tensão-deformação e o número de ciclos até atingir a ruptura, são aplicadas através de ensaios feitos em laboratórios com cargas repetidas que são conduzidos a diversos níveis de tensão ou de deformação e visam reproduzir as condições das misturas asfálticas em camadas de pavimentos em campo (FONTES, 2009). Apesar dessas preocupações, ainda é difícil a reprodução em laboratório dos carregamentos que ocorrem no pavimento sob a ação do tráfego, visto que, nos ensaios, são aplicadas níveis de carga que se mantem iguais ao longo do tempo, embora haja a possibilidade da aplicação de níveis de carga variáveis, em que se controla a tensão ou a deformação de tração. Porém, é possível avaliar os módulos e características de fadiga em um conjunto de condições de carga (CAPITÃO, 2003 *apud* FONTES, 2009).

Em laboratório, portanto, o carregamento pode ser aplicado em tensão controlada, de modo que a carga ou a amplitude permanece constante ao longo do ensaio, ou em deformação controlada, quando a deformação ou a amplitude de deformação se mantém constante durante todo o ensaio (MONISMITH *et al.*, 1971 *apud* FONTES, 2009). O critério de ruptura em ensaios de fadiga à deformação controlada, que é comumente utilizada como critério de ruptura por fadiga, é definido como a condição do material que corresponde ao decréscimo de 50% da sua rigidez inicial. Nestes ensaios, a relação entre o número de ciclos de carga para a ruptura e a deformação de tração é expressa através da Equação 1 (MONISMITH *et al.*, 1971):

$$N = a \times \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^b$$

onde:

N = vida de fadiga expressa em termos de número de solicitações de carga para a ruptura;

ε = deformação de tração;

a e b = constantes determinadas experimentalmente.

3.1 Ensaio de Fadiga Convencional

No Brasil, o ensaio tradicional de vida de fadiga para determinação do número de repetições de carga pode ser realizado por compressão diametral (Figura 5) à tensão controlada (TC) com carga aplicada de 1Hz através de um equipamento pneumático (PINTO, 1991; RODRIGUES 1991; MEDINA, 1997). Durante o ensaio de fadiga, a deformação de tração aumenta até o rompimento completo do corpo de prova. Esse tipo de ensaio é compatível com a caracterização de materiais de revestimentos asfálticos mais espessos em decorrência da predominância de absorção das tensões pelo revestimento com relação às camadas subjacentes (PINTO, 1991; HUANG, 1993).



Figura 5- Ensaio Tradicional de Vida de Fadiga por Compressão Diametral

No ensaio à deformação controlada (DC), a simulação corresponde à revestimentos mais delgados, já que existe uma maior absorção de tensões solicitantes nas subcamadas. Segundo Huang (1993), em revestimentos com espessuras menores que 50 mm, não há um decréscimo suficiente na rigidez, quantificada pelo módulo de rigidez por flexão (S_0) (SHRP, 1994), de modo a causar uma variação no nível de deformação ao longo dos diversos carregamentos. Nesse ensaio, a deformação é mantida constante enquanto a tensão inicial no corpo de prova diminui até o fim do ensaio. Alguns autores afirmam que o limite de ruptura corresponde à 50% da rigidez inicial da mistura (EPPS e MONISMITH, 1969; PRONK e HOPMAN, 1990; TAYEBALI *et al.*, 1993).

A vida de fadiga pode ser determinada por ensaios com corpos de prova cilíndricos (Figura 6), trapezoidais, que são utilizados na França (Figura 7), ou barras prismáticas, que são usados no equipamento *Four Point Bending Apparatus* (Figura 8).



Figura 6 - Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos



Figura 7 - Flexão de Corpos de Prova Trapezoidais

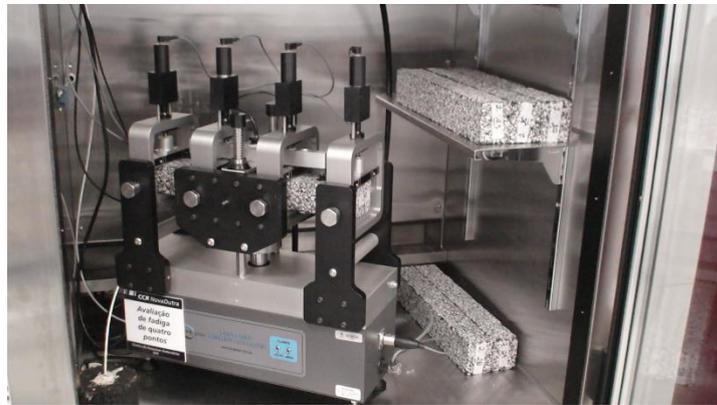


Figura 8 - Flexão de Barras Prismáticas ou Vigas

No Brasil, o ensaio de fadiga comumente utilizado é à compressão diametral sob tensão e temperatura controladas. O ensaio consiste na aplicação de uma carga a uma frequência de 60 aplicações por minuto com 0,10 segundo de duração do carregamento repetido. Uma câmara com sistemas de aquecimento e refrigeração ligados a um termostato controlam a temperatura. Determinam-se, para cada mistura ensaiada, a relação entre o número de repetições à ruptura e o nível de tensões atuante. Na Figura 9, ilustra essa relação para três misturas distintas.

$$N = k_1 \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^{n_1} \quad \text{ou} \quad N = k_2 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_2}$$

Onde:

N = número de repetições do carregamento necessário à ruptura completa da amostra (vida de fadiga);

σ_t = tensão de tração repetida solicitante;

$\Delta\sigma$ = diferença algébrica entre tensões horizontal (de tração) e vertical (de compressão) no centro da amostra (Figura 10);

k_i, n_i = constantes obtidas na regressão linear dos pares N e σ_t (ou $\Delta\sigma$) determinados em ensaios, em escalas logarítmicas.

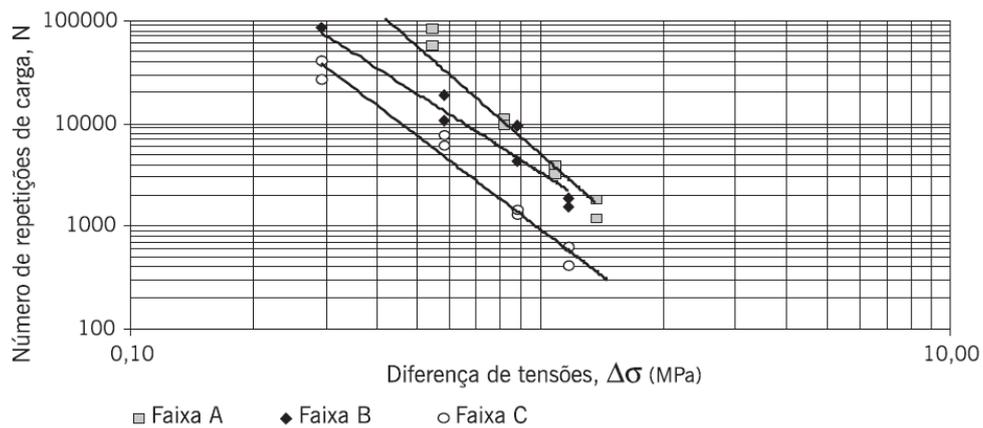


Figura 9 - Vida de fadiga considerando diferentes faixas granulométricas (FONTES, 2009).

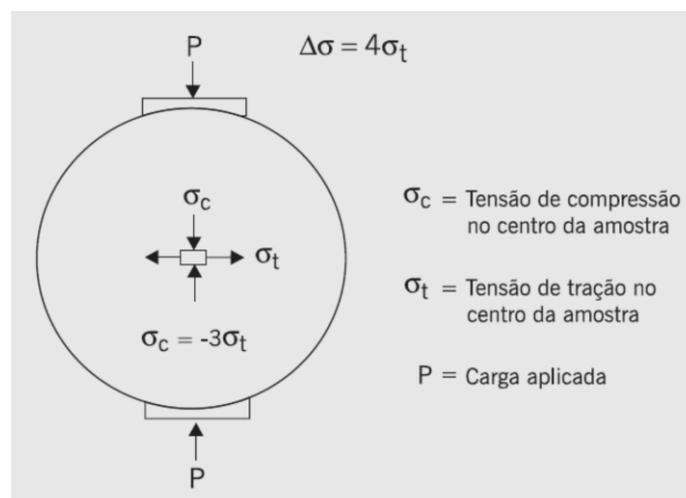


Figura 10 - Representação das tensões no centro da amostra de um corpo de prova cilíndrico (FONTES, 2009).

No ensaio de fadiga com tensão controlada, é considerada a tensão solicitante no corpo de prova como constante, porém, o carregamento constante ao longo do ensaio não é traduzido em uma tensão solicitante constante, portanto, ela representa uma aproximação. As tensões no corpo de prova admitem que ele seja constituído de material elástico, isotrópico e sem danos. Todavia, vale ressaltar que à medida que o carregamento é repetido, há um dano progressivo no corpo de prova.

No ensaio de fadiga com deformação controlada, é utilizado o modelo que leva em consideração a deformação de tração medida no centro do corpo de prova (Σt):

$$N = k_3 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{n_3}$$

O dimensionamento mecanístico de pavimentos adotado no Brasil considera que a diferença das tensões máxima de compressão e de tração na fibra inferior do revestimento ($\Delta\sigma$) é o principal fator desencadeador do trincamento por fadiga do revestimento em campo, quando se utiliza os resultados dos ensaios à tensão controlada em compressão diametral obtidos em laboratório. As tensões calculadas servem de entrada de dados nas curvas de fadiga geradas a partir do número de ciclos de carga até a ruptura para diversos níveis de $\Delta\sigma$. É relacionado, então, o número N determinado pela previsão de tráfego na via com o número de golpes em laboratório por um fator laboratório-campo FLC. Pinto (1991) determinou que existem diferenças entre FLC para ensaios de flexão e a compressão diametral, por causa da porcentagem de área trincada que se admite ao final da vida do pavimento e, também, em questões de tempo de aplicação de carga e da frequência. De acordo com Carpenter *et al.* (2003), o limite de ruptura do concreto asfáltico é correspondente ao momento em que a mistura começa a apresentar as primeiras microtrincas.

É comum o uso de FLCs, independente do material ou do modelo adotado, já que há a dificuldade de considerar determinados fatores nos ensaios e no cálculo de tensões geradas no corpo de prova. É necessário ressaltar que não são considerados o envelhecimento da mistura e da progressão do dano no material durante o ensaio, além de aspectos presentes no campo que não são simulados em laboratório, como a variação térmica, presença de cargas estocásticas e a ocorrência do fenômeno de recuperação de trincas, em virtude da ausência de cargas em alguns períodos (KIM *et al.*, 1990;

RODRIGUES, 1991; KIM e LITTLE, 1995; KIM e LEE, 1995; KIM *et al.*, 1997; LITTLE *et al.*, 1999; BALBO, 2000).

Deste modo, o ensaio de fadiga tem sido usualmente utilizado para fins de comparação entre misturas, embora seja preciso cautela para uma conclusão direta somente a partir das curvas, já que o estado de tensões gerado em cada situação depende de estrutura e do valor de MR das camadas constituintes dos pavimentos (MOTTA, 1991; PINTO, 1991; MEDINA, 1997).

Geralmente existe uma tendência não adequada de se considerar, ao comparar duas misturas, a curva de maior k como a maior vida de fadiga. Isto só é válido somente quando o σ_t (ou $\Delta\sigma$) gerado é o mesmo. Os maiores k s quase sempre estão associados a maiores MRs, mas essas misturas com maiores MRs absorvem mais tensões numa estrutura de pavimento, e, por isso, os níveis de tensões de tração para comparação das vidas de fadiga de duas misturas devem ser correspondentes a cada caso estudado (FONTES, 2009).

No ensaio convencional são consideradas tensões relativas ao início do ensaio (1º ciclo), portanto, sem o acúmulo de danos e assumindo o material como elástico linear e homogêneo. Com o dano progressivo, as tensões que acontecem internamente no corpo de prova sofrem alterações, já que a carga do ensaio permanece a mesma e a rigidez da mistura é reduzida devido às trincas que se formam e coalescem. Para aprofundar o entendimento do fenômeno de evolução do dano por fadiga em laboratório existem outros estudos que apresentam diferentes critérios de ruptura que não são o rompimento total do corpo de prova (DIJK, 1975; PHANDNAVIS e SWAMINATHAN, 1997; GHUZLAN e CARPENTER, 2000; CARPENTER *et al.*, 2003). Esses critérios que vêm sendo apresentados como potenciais indicativos de ruptura da mistura são, por exemplo, a deformação crítica de tração, diferentes relações entre esta e a deformação inicial, energia dissipada e também relações entre a energia dissipada e a energia dissipada inicial (LOUREIRO, 2003). Porém, o número de golpes continua sendo, no ensaio de tensão controlada, o parâmetro de comparação e previsão de vida de fadiga das misturas asfálticas estudadas no Brasil (FONTES, 2009).

3.2 Ensaio de Fadiga com *Four Point Bending Apparatus*

Um ensaio novo utilizado para determinar a curva de fadiga é realizado com o *Four Point Bending Apparatus*, conhecido como ensaio de flexão de quatro pontos em vigas prismáticas, feito de acordo com a norma AASHTO TP8-01 (*Standard Test Method for Determining the Fatigue Life Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending*). O ensaio é conduzido a deformação controlada, com frequência de 10 Hz e temperatura a 20°C, aplicando-se um carregamento senoidal alternado sem período de repouso (FONTES, 2009).

No ensaio de carregamento de quatro pontos, a zona central de momento fletor constante com esforço de cisalhamento nulo é o mais indicado para a determinação da resistência à fadiga das misturas asfálticas. As Figuras 11a e 11b ilustram o aparelho utilizado (*Four Point Bending Apparatus*) e a câmara de acondicionamento do equipamento. A Figura 12 apresenta as dimensões dos corpos de prova utilizados e a geometria do carregamento aplicado (FONTES, 2009).

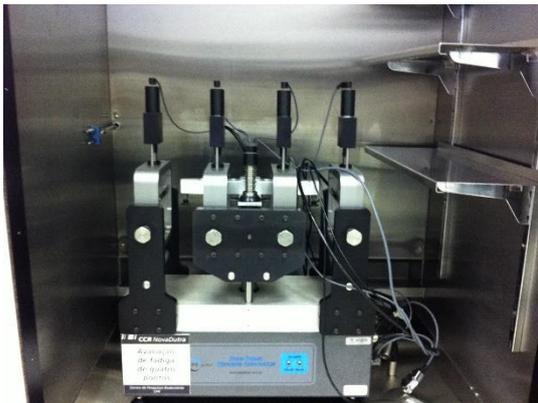


Figura 11a – Equipamento Hidráulico e de Aquisição de Dados



Figura 11b – Dispositivo para Ensaio de Flexão em Quatro Pontos na Câmara de Controle de Temperatura

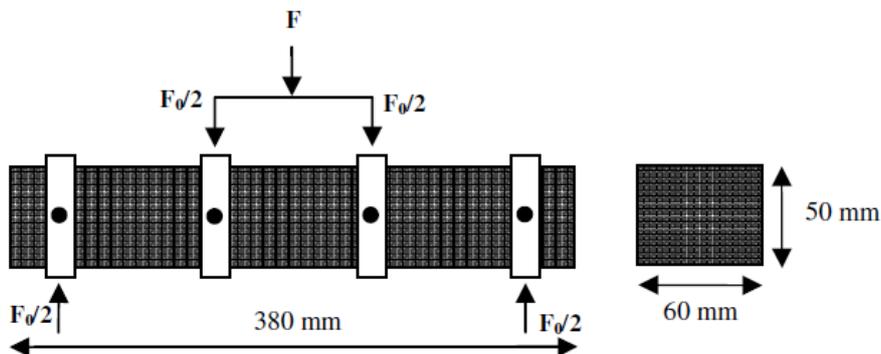


Figura 12 - Representação do Carregamento Aplicado (FONTES, 2009)

As propriedades relativas à rigidez dos materiais são representados pelo módulo dinâmico e do ângulo de fase. O ensaio de módulo complexo é feito no mesmo equipamento de avaliação de resistência à fadiga e o resultado é apresentado através do módulo dinâmico. Segundo a norma ASTM D 3497 (1995) o conceito de módulo dinâmico é “o valor absoluto do módulo complexo que define as propriedades elásticas de um material viscoelástico linear submetido a um carregamento sinusoidal”, sem períodos de repouso. O módulo complexo é um número complexo determinado pela razão entre a amplitude complexa de uma tensão sinusoidal a uma pulsação ou velocidade angular ($\omega = 2\pi Fr$) aplicada a um material e a amplitude complexa de uma deformação de tração sinusoidal (FONTES, 2009). Considerando o comportamento viscoelástico do material, a deformação possui um atraso em relação a tensão, que é constituído pelo ângulo de fase ou de defasagem (DI BENEDETTO e DE LA ROCHE, 1998 *apud*. FONTES, 2009).

3.2.1 Equipamento de fadiga de viga apoiada em quatro pontos

O conjunto para ensaio de fadiga é composto por componentes que permitem o controle da frequência, carga, deformação e temperatura aplicadas durante o ensaio. São eles:

- Câmara ambiental
- Reservatório pneumático
- Equipamento de Fadiga
- Controlador IMACS
- Computador com software UTS015

a) **Câmara ambiental:** é o componente que permite o controle de temperatura de ensaio, sua operação é independente e possui controle microprocessado de temperatura e interruptores para acionamento das luzes e circulação de ar.



Figura 13 - Câmara Ambiental

- b) **Reservatório pneumático:** é o componente que fornece o ar comprimido em condições de operação para o equipamento de fadiga, em seu corpo está acoplado um regulador de pressão e um secador para auxiliar nesta função.



Figura 14 - Reservatório pneumático

- c) **Equipamento de fadiga:** é o responsável pela aplicação das cargas ao corpo de prova (vigota). Ele possui um cilindro pneumático alimentado pelo reservatório pneumático e controlado pelo IMACS conectado a um computador.

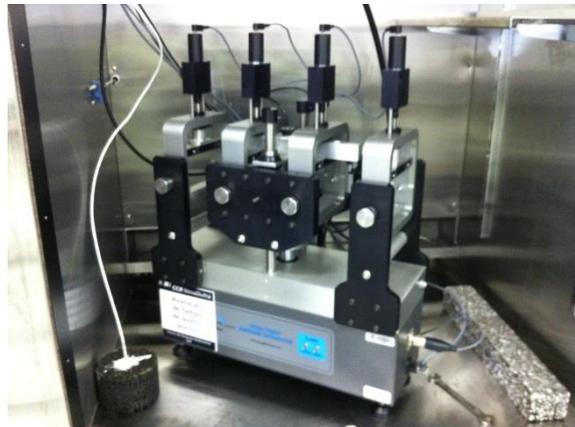


Figura 15 - Equipamento de fadiga

- d) **Controlador IMACS:** é o componente responsável pelo controle de dados do computador. Ele transforma os dados em sinais para operação do equipamento de fadiga.



Figura 16 - Controlador IMACS

- e) **Computador com software UTS015:** é necessário para inserção dos dados e acompanhamento do ensaio. “O software fornece um relatório resumido com os principais dados do ensaio e também permite exportar dados em arquivo “.csv” para uma avaliação mais aprofundada.

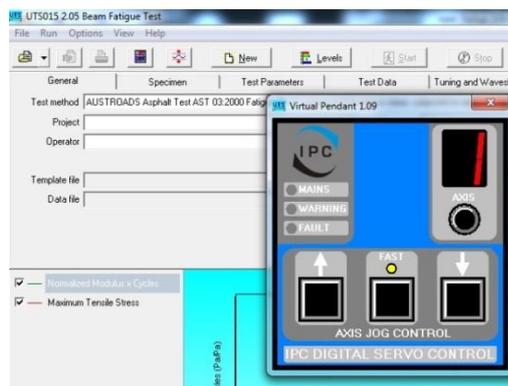


Figura 17 - Software UTC

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram empregados os materiais (agregados e ligantes asfálticos) mais utilizados na empresa CCR Nova Dutra em suas obras de pavimentação, já que os ensaios foram realizados no laboratório desta empresa.

Os agregados utilizados são: Brita 1, pó de pedra e cal. Os ligantes utilizados são: CAP 30/45, CAP modificado com borracha, CAP modificado com polímero 60/85 e CAP com 7,5% de SBS.

O método de Dosagem foi o Marshall, com a aplicação de 75 golpes em misturas densas (GAP GRADED) e foram aplicados 50 golpes por face de corpo de prova em misturas descontínuas (SMA). Após a determinação do teor ótimo, os corpos de prova foram moldados com o compactador giratório com esse teor.

Foram escolhidas 2 faixas granulométricas, que são as mais utilizadas pela CCR Nova Dutra: uma faixa DERSA – Faixa III; uma faixa do GAP GRADED. São apresentados a seguir os materiais e métodos de ensaios a serem utilizados neste trabalho.

a) Agregados: 2

A - Pedreira Jambeiro;

B - Pedreira Pombal.

b) Ligantes asfálticos: 4

I - CAP 30/45;

II - CAP modificado com borracha;

III - CAP modificado com polímero 60/85;

IV - CAP com 7,5% de SBS.

c) Faixas granulométricas: 2

I - Faixa III - DERSA

II- GAP GRADED

Os projetos de misturas contemplaram as seguintes combinações de agregados, ligantes asfálticos e faixas granulométricas que são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 - Combinações de Materiais

PEDREIRA	LIGANTE ASFÁLTICO	FAIXA GRANULOMÉTRICAS	
POMBAL PBL	CAP 30/45 = CAP I	CA Faixa III DERSA	GAP GRADED
	CAP borracha = CAP II		
	CAP 60/85 = CAP III		
	CAP SBS = CAP IV		
JAMBEIRO JBR	CAP 30/45 = CAP I	DERSA	GAP
	CAP borracha = CAP II		
	CAP 60/85 = CAP III		
	CAP SBS = CAP IV		

4.1 Materiais

4.1.1 Caracterização dos Ligantes

A caracterização dos ligantes foi realizada por meio dos ensaios convencionais conforme Resoluções 019/2005, 031/2007 e 039/2008 da ANP, as quais especificam as características dos CAP's convencionais, asfalto polímero e asfalto borracha, respectivamente. A Tabela 2 mostra um quadro com resultado dos ensaios dos ligantes utilizados neste trabalho:

Tabela 2 - Resultados da Caracterização dos Ligantes

Características	Unidades	Resultados			
		30/45	Borracha	60/85	7,5% SBS
Densidade	g/dm ³	1,013	1,031	1,006	1,011
Viscosidade Brookfield a 135°C, 20 rpm	cP	505	-	1998	1685
Viscosidade Brookfield a 150°C	cP	244	-	859	690
Viscosidade Brookfield a 177°C	cP	85	1845*	268	229
Penetração (100g, 5s, 25°C) (<i>Pen</i>)	0,1mm	33	41	51	40
Ponto de Amolecimento (<i>Pa</i>)	°C	54	62	62	72
Índice de Susceptibilidade Térmica (<i>I</i>)	-	-1,2	-	-	-
Espuma a 177°C	-	negativo	-	negativo	negativo
Recuperação Elástica por torção	%	-	68	60	63,5

*Ensaio realizado a 175°C.

4.1.2 Caracterização dos Agregados

Os agregados foram caracterizados segundo a sua granulometria, densidade real, densidade aparente e abrasão Los Angeles (brita 1 e pedrisco). Na Tabela 3 são mostrados os resultados dos ensaios de agregados das pedreiras Jambreiro e Pombal.

Tabela 3 - Resultados dos Ensaios de Caracterização de Agregados

Peneira	Abertura	Pedreira Pombal			Pedreira Jambreiro		
		% passante			% passante		
#	Mm	Brita 1	Pedrisco	Pó de pedra	Brita 1	Pedrisco	Pó de pedra
1"	25,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,0	98,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,5	28,4	99,8	100,0	36,6	100,0	100,0
3/8	9,5	5,9	86,0	100,0	12,2	85,8	100,0
Nº 8	2,36	1,1	11,9	99,1	1,5	3,2	97,2
Nº 10	2,00	1,0	5,6	82,1	1,0	2,2	69,3
Nº 16	1,18	1,0	4,9	56,6	0,9	2,0	36,4
Nº 30	0,60	0,8	3,9	35,6	0,7	1,7	21,4
Nº 200	0,075	0,5	2,1	14,9	0,5	1,3	12,5
Densidades	Real	2,805	2,822	2,853	2,661	2,662	2,662
	Aparente	2,764	2,756	2,837	2,635	2,623	2,629
Abrasão Los Angeles (%)		46,5	46,4		34,3		

4.2 Misturas Asfálticas

Para a dosagem das misturas densas foi empregada a metodologia Marshall, onde foram aplicados 75 golpes por face para moldagem dos corpos de prova. Foram determinados os principais parâmetros volumétricos: massa específica aparente do corpo de prova (Gmb), volume de vazios da mistura (Vv), vazios do agregado mineral (VAM) e relação betume vazios (RBV), além do parâmetro mecânico de resistência à tração da mistura asfáltica. Para determinar o teor ótimo de asfalto foi considerado o volume de vazios igual a 4,0%.

As Tabelas 4 e 5 e as Figuras 18 e 19 apresentam os limites inferior e superior das faixas adotadas, assim como os limites dos parâmetros volumétricos das misturas densas e descontínua, respectivamente.

Tabela 4: Limites da faixa densa adotada.

PENEIRAS		CA - FAIXA III DERSA	
#	mm	Mín.	Máx.
1"	25,0	100	100
3/4"	19,0	100	100
1/2"	12,5	80	100
3/8"	9,5	70	90
Nº 4	4,75	50	70
Nº 10	2,00	33	48
Nº 40	0,42	15	25
Nº 80	0,18	8	17
Nº 200	0,075	4	10
Parâmetros		Mínimo	Máximo
VCA, %		65	75
VAZIOS, %		3	5
VAM, %		14,0	
Resistencia a tração, MPa		0,6	
Filer / ligante		0,6	1,6
Danos por umidade induzida, %		75	
Diâmetro máximo, mm		12,5	
Especificação		DERSA ET - P00/027 REV A de 08/04/1997	

Tabela 5: Limites da faixa descontínua.

PENEIRAS		GAP GRADED	
#	mm	min	max
1"	25,0	100	100
3/4"	19,0	100	100
5/8"	15,9	100	100
1/2"	12,5	90	100
3/8"	9,5	78	92
Nº 4	4,75	28	42
Nº 8	2,36	15	25
Nº 16	1,18		
Nº 30	0,60	10	20
Nº 50	0,30		
Nº 200	0,075	2	7
Parâmetros		Mínimo	Máximo
VAM, %			
VCA, %		60	70
VAZIOS, %		4	6
Resistencia a tração, MPa		0,6	
Filer / Ligante		0,6	1,6
Dano por umidade induzida, %		75	
Escorrimento, %		75	
Diâmetro máximo, mm		12,5	
Teor de ligante, %		12,5	
Especificação		CALTRANS SSP 39-700 A-10-01-01	

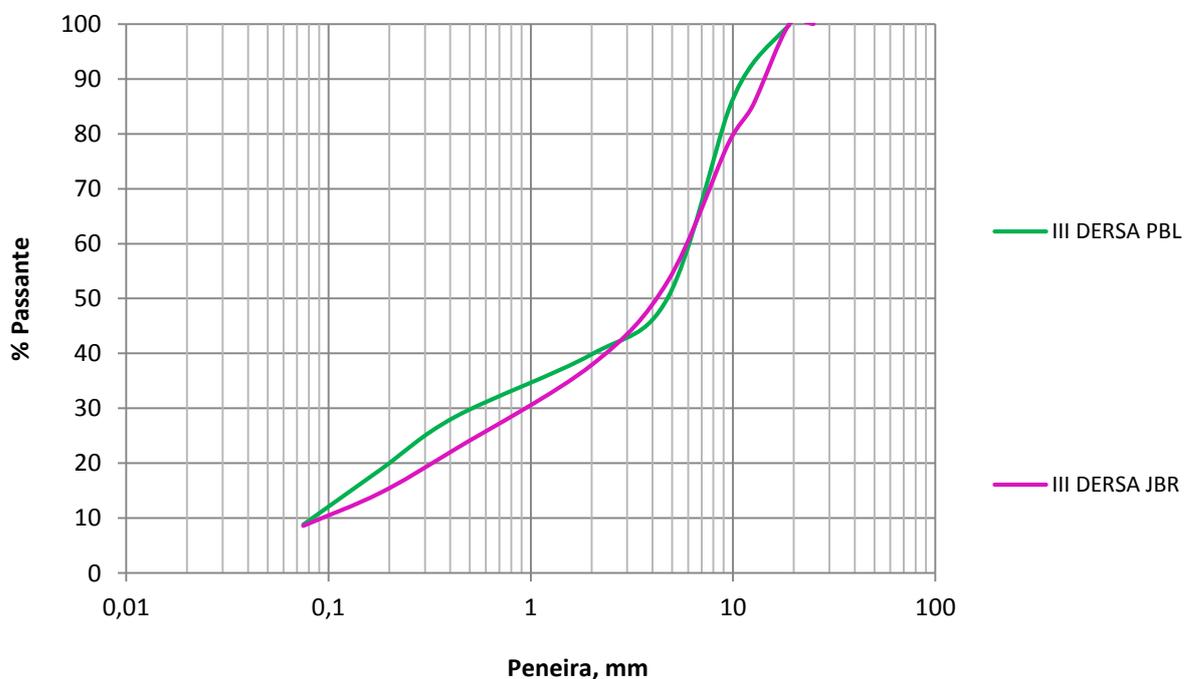


Figura 18: Curvas granulométricas das faixas densas utilizadas nesta pesquisa.

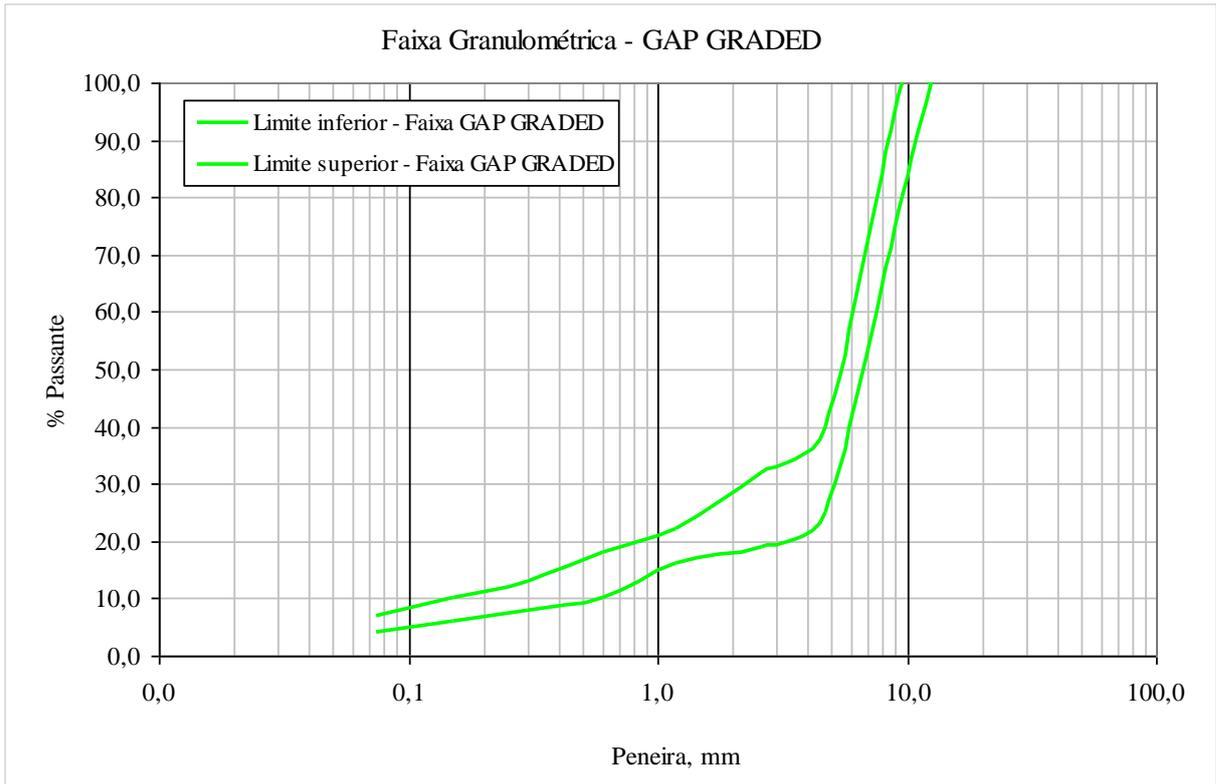


Figura 19: Limites inferior e superior da faixa descontínua.

Os projetos de misturas elaborados estão identificados nas tabelas 6 e 7, de acordo com os materiais constituintes e a faixa granulométrica.

Tabela 6: Identificação das misturas, em função dos materiais e da faixa granulométrica.

Faixa	III DERSA		GAP GRADED	
	Jambeiro	Pombal	Jambeiro	Pombal
CAP				
30/45	P21	P9	P25	P29
Borracha	P22	P10	P26	P30
Polímero 60/85	P23	P11	P27	P31
7,5% SBS	P24	P12	P28	P32

Tabela 7: Identificação das misturas conforme os materiais constituintes.

MISTURA	CAP	PEDREIRA DE ORIGEM DOS AGREGADOS	FAIXA GRANULOMÉTRICA
P9	30/45	Pombal	III DERSA
P10	Borracha	Pombal	III DERSA
P11	60/85	Pombal	III DERSA
P12	SBS	Pombal	III DERSA
P21	30/45	Jambeiro	III DERSA
P22	Borracha	Jambeiro	III DERSA
P23	60/85	Jambeiro	III DERSA
P24	SBS	Jambeiro	III DERSA
P25	30/45	Pombal	GAP GRADED
P26	Borracha	Pombal	GAP GRADED
P27	60/85	Pombal	GAP GRADED
P28	SBS	Pombal	GAP GRADED
P29	30/45	Jambeiro	GAP GRADED
P30	Borracha	Jambeiro	GAP GRADED
P31	60/85	Jambeiro	GAP GRADED
P32	SBS	Jambeiro	GAP GRADED

Os parâmetros volumétricos (teor ótimo de ligante adicionado, absorção do asfalto pelo agregado (Absorção), densidade máxima da mistura pelo método Rice (Gmm), teor de vazios de ar (Va), vazios do agregado mineral (VAM), vazios cheios de asfalto (VCA), relação filer/asfalto e a relação porcentagem de asfalto em volume/volume total em massa, Vt) e a resistência à tração (RT) foram determinados para as todas as misturas e os resultados são apresentados nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 - Parâmetros de dosagem das misturas com agregados oriundos da pedreira Pombal.

Parâmetros	Misturas							
	P9	P10	P11	P12	P25	P26	P27	P28
Teor de asfalto, %	5,0	5,7	4,9	5,0	4,3	5,0	4,3	4,5
Absorção, %	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1	0,2
Gmm	2,577	2,555	2,579	2,580	2,589	2,561	2,587	2,580
Va, %	4,2	4,1	4,1	4,1	4,9	4,9	4,6	4,9
VAM, %	15,8	17,1	15,6	15,6	14,9	16,5	14,8	15,5
VCA, %	73,7	75,9	73,6	73,7	67,4	70,5	68,7	68,1
RT, MPa	2,0	1,6	2,0	2,3	1,9	1,4	1,4	1,8
Filer / ligante	1,8	1,6	1,9	1,9	1,1	0,9	1,1	1,0
% asfalto / Vt	12,7	14,1	12,6	12,8	11,0	12,4	11,0	11,5

Tabela 9 - Parâmetros de dosagem das misturas com agregados oriundos da pedreira Jambeiro.

Parâmetros	Misturas							
	P21	P22	P23	P24	P29	P30	P31	P32
Teor de asfalto, %	4,5	5,3	4,6	4,6	4,7	5,9	5,0	5,2
Absorção, %	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,4	0,4
Gmm	2,474	2,450	2,469	2,470	2,453	2,421	2,442	2,437
Va, %	3,9	4,1	4,2	4,0	5,1	5,2	5,2	5,0
VAM, %	13,9	15,6	14,4	14,2	15,1	17,4	15,8	16,6
VCA, %	72,1	73,8	70,9	71,8	66,2	69,8	67,0	68,6
RT, MPa	2,5	1,7	1,9	2,4	1,6	1,3	1,4	1,6
Filer / ligante	2,0	1,7	2,0	2,0	1,3	1,1	1,3	1,2
% asfalto / Vt	11,0	12,6	11,3	11,2	11,4	13,9	12,1	12,6

4.3 Método de Ensaio – Fadiga de Viga de Quatro Pontos

O ensaio da vida de fadiga apoiada em quatro pontos, chamado de fadiga de viga em quatro pontos, é utilizado na engenharia de materiais para a estimativa da vida de fadiga. A área naval, aeroespacial, ortopedia e estruturas em geral aplicam este mecanismo de avaliação para garantir que o material trabalhe apenas a flexão, sem influência de esforços normais ou cortantes.

O 4BP (ensaio de fadiga de viga em 4 pontos) é utilizado de modo a permitir que no centro da viga exista um momento constante máximo ou mínimo (quando há inversão do sentido da força) e esforço cortante nulo, isto é, condição de flexão pura. Assim, se garante que as trincas não são devido ao cisalhamento, conforme ilustra a Figura 20.

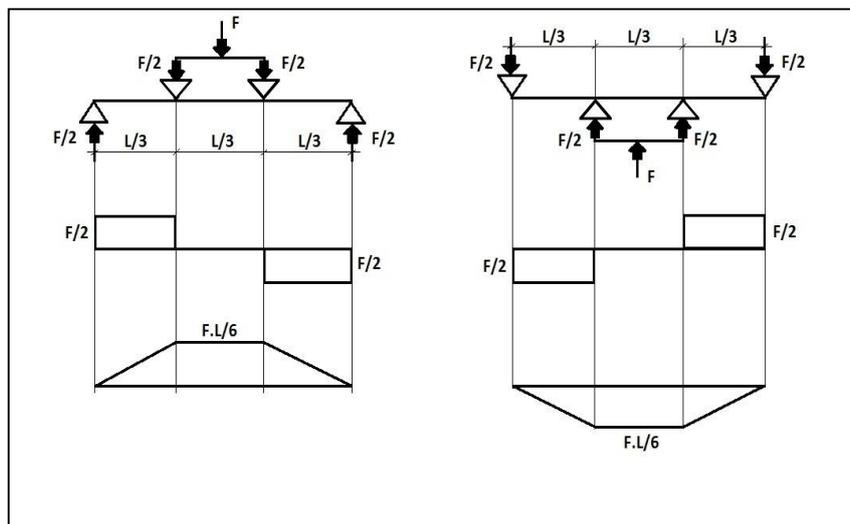


Figura 20 - Diagrama de Esforços na Viga (FONTE: Relatório da Nova Dutra)

A existência de momento máximo e mínimo se dá devido à inversão do sentido da força durante o ensaio, gerando tração das fibras inferiores da viga num determinado momento e durante igual tempo gerando tração das fibras superiores. Este tempo total equivale a um ciclo.

As normas AASHTO T321-07 e ASTM D 7460-08 descrevem o ensaio de fadiga em 4 pontos de vigas de misturas asfálticas, em que definem o parâmetro de rigidez à flexão da viga como a relação entre a tensão máxima de tração e a deformação máxima da viga, conforme seguinte equação:

$$S = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t}$$

onde:

S = Rigidez à flexão da viga;

σ_t = Tensão aplicada;

ε_t = Deformação.

A rigidez é o parâmetro utilizado para se definir a condição de fadiga da viga. A norma da AASHTO define o fim do ensaio quando a rigidez da viga alcança 50% da rigidez inicial, enquanto que a ASTM recomenda 40%. Esta redução de rigidez se dá devido às microfissuras que evoluem durante o processo de aplicação de ciclos de cargas (ADHIKARI e YOU, 2010).

A frequência estabelecida em normas para o ensaio é de 5Hz a 10Hz e temperatura de 20°C, entretanto os equipamentos permitem a variação destes dados, facilitando uma análise mais aprofundada dos materiais e permitindo a avaliação em situações bem diferentes de clima e tráfego.

Há vários modelos para se estimar a vida de fadiga de uma amostra de mistura asfáltica. O mais simples é baseado apenas na deformação ou na tensão, conforme as seguintes equações:

$$N_f = K_1 \frac{1^{K_2}}{\epsilon_t} \qquad N_f = K_1 \frac{1^{K_2}}{\sigma_t}$$

onde:

N_f = vida de fadiga – números de ciclos até 50% ou 40% da rigidez inicial;

ϵ_t = deformação;

σ_t = tensão aplicada;

K_1 e K_2 = coeficientes.

Os coeficientes são determinados por meio de regressão linear e desta forma foi possível a determinação de dois modelos muito utilizados na estimativa de vida de fadiga de misturas asfálticas:

Shell Model:
$$N_f = 0,0796.(\epsilon_t)^{-3,291}.S^{-0,854}$$

Asphalt Institute Model:
$$N_f = 0,0685.(\epsilon_t)^{-5,671}.S^{-2,363}$$

onde:

N_f = vida de fadiga;

ϵ_t = deformação (in/in);

S = rigidez (Psi).

As vigotas utilizadas como corpos de prova para ensaio de fadiga devem possuir comprimento de 380 ± 6 mm, largura de 63 ± 6 mm e altura de 50 ± 6 mm. A temperatura do ensaio segundo norma é de $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$, portanto, deve-se ter o cuidado de se condicionar os corpos de prova por no mínimo 2 horas para que não haja influência da temperatura.

4.3.1 Moldagem dos Corpos de Prova

A moldagem dos corpos de prova requer muito cuidado. Foi utilizado o compactador PResBOX – IPC (Figura 21), que utiliza o princípio do amassamento e produz prismas de 45 cm de comprimento, 15 cm de largura e altura 14,5 cm e 18,5 cm. Destes prismas são extraídos 4 vigotas que são obtidas por serragem utilizando o equipamento Autosaw – IPC, que possui gabaritos para otimizar os cortes, garantindo precisão das dimensões das vigotas e rapidez na execução.



Figura 21 - Equipamento PResBOX

Antes da moldagem dos corpos de prova é necessário que os acessórios (base do molde, quarteador, placas e recipientes) sejam mantidos em estufa por pelo menos uma hora e a pressão de operação deve ser entre 800 e 1000 kPa. Os parâmetros para a moldagem são inseridos através de um software instalado no computador (Figura 22).

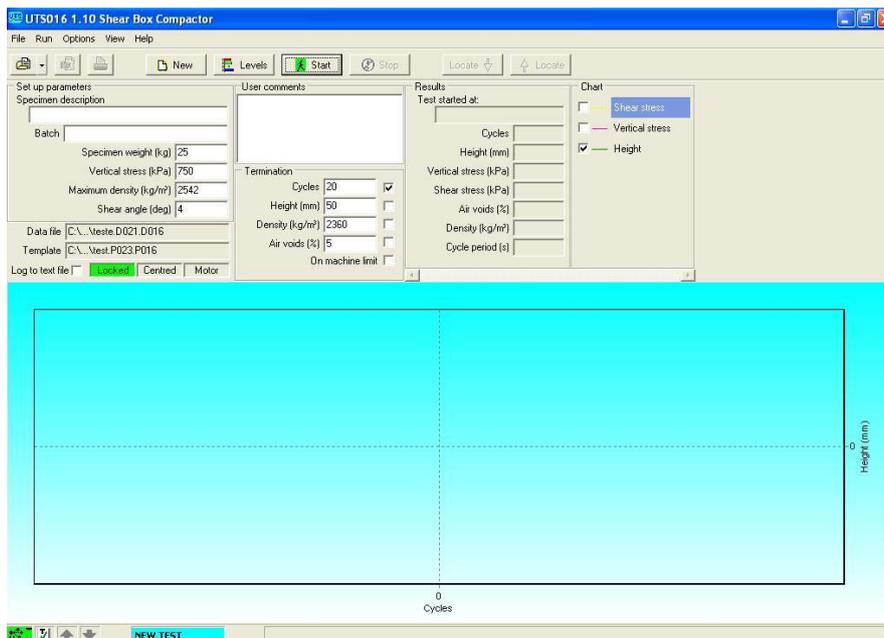


Figura 22 – Tela do Software Utilizado na Calibração do Equipamento PResBOX

Antes de colocar a massa dentro do molde, é necessária a inserção de uma placa de metal aquecida e, também, é preciso untar as paredes laterais e a placa com óleo vegetal ou outro produto para evitar a aderência da massa. O quarteador é inserido para que não haja a segregação da massa. Depois que a mistura asfáltica é colocada no molde, é utilizada uma espátula para regularizar a massa. As figuras 23, 24, 25, 26 e 27 ilustram esses cuidados necessários na moldagem dos corpos de prova.



Figura 23 - Molde do Prisma

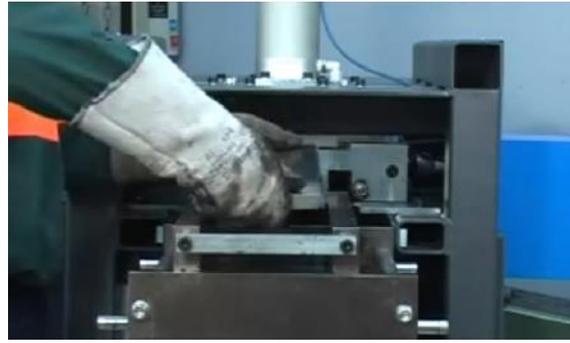


Figura 24 - Inserção da base do molde e da placa de metal



Figura 25 - Inserção do quarteador



Figura 26 - Massa dentro do molde com o quarteador



Figura 27 - Regularização da mistura

Após colocar a massa deve-se inserir uma placa de metal para evitar sua aderência no base superior do molde, como ilustram as Figuras 28a e 28b. Na colocação do molde no PResBOX é necessário o cuidado de não bater e deslocar o sensor (Figuras 29a e 29b) e também verificar se o software apresenta os ícones LOCKED e CENTERED estão verdes, caso contrário, o molde pode estar descentralizado (Figura 30).



Figuras 28a e 28b - Inserção da placa de metal



Figura 29a e 29b - Colocação do molde no PResBOX

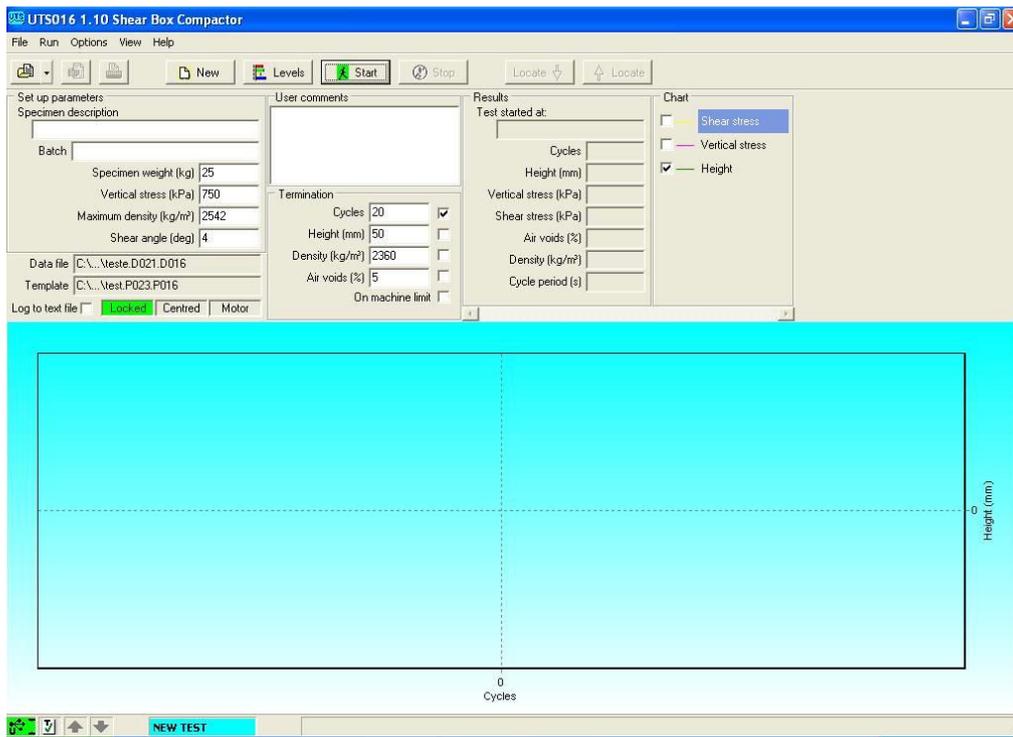


Figura 30 - Tela do Software com os botões "Locked" e "Centered"

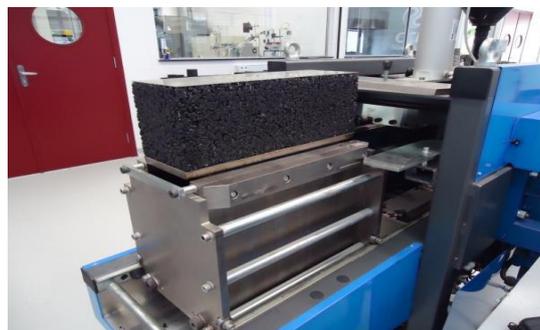


Figura 31 - Bloco extraído após a moldagem

Após a moldagem, os blocos foram cortados para obter as dimensões adequadas para realizar o ensaio de fadiga em quatro pontos. O equipamento utilizado é a Autosaw (Figura 32).



Figura 32 - Equipamento Autosaw

Para que os corpos de prova fiquem nas dimensões necessárias para o ensaio é preciso que a serragem em quatro partes iguais do bloco. Após isso, as vigotas passam novamente pelo Autosaw para que fiquem nas dimensões exatas para a execução do ensaio.



Figura 33a e 33b – Serragem do prisma em dois pedaços iguais



Figura 33c – Prisma serrado



Figuras 34a e 34b - Serragem da metade do prisma



Figura 34c - Prisma serrado



Figuras 35a e 35b - Serragem da vigota para que fique nas dimensões adequadas



Figura 35c - Vigotas serradas

4.3.2 Execução do Ensaio de Fadiga de Viga em Quatro Pontos

Foram ensaiadas nove vigotas de cada mistura utilizando o princípio da deformação controlada, cujos valores adotados foram: $300\mu\epsilon$, $450\mu\epsilon$ e $600\mu\epsilon$. Embora estas deformações sejam bem maiores do que as apresentadas em campo, as normas sugerem os ensaios com deformações entre $200\mu\epsilon$ e $800\mu\epsilon$. Um dos motivos pode ser o grande tempo de execução do ensaio quando utilizadas deformações muito pequenas, que dependendo da temperatura adotada e frequência admitida, o ensaio de uma única vigota pode durar meses.

A temperatura e frequência adotadas para o ensaio também foram as estabelecidas pelas normas: $20^{\circ}\text{C}\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e frequência de 10Hz, embora se saiba que para as condições brasileiras estas condições deveriam ser revistas. As normas permitem a variação da frequência entre 5Hz e 10Hz e o equipamento permite essa variação de frequência assim como dispõe de uma câmara ambiental que permite a variação da temperatura entre -14°C e 60°C .

O software utilizado para aquisição de dados foi o UTS015, que é fornecido juntamente com o equipamento. Um dos dados fornecido é a rigidez à flexão da viga, que é um dado importante, já que é através dele que se determina a condição de fadiga da viga. Os dados de deflexão da viga, deformação, energia dissipada, carga aplicada e módulo dinâmico nas condições de frequência e temperatura do ensaio, também são fornecidos a cada segundo.

4.3.2.1 Operação do equipamento

Na operação do equipamento é preciso que alguns cuidados sejam tomados:

- A câmara ambiental deve ser ligada até que a temperatura de ensaio seja estabilizada;
- Os corpos de prova devem ser colocados na câmara ambiental por pelo menos duas horas para garantir a temperatura do ensaio;
- Verificação da alimentação de ar comprimido, já que a pressão de ensaio é entre 8 a 10 bar.

5. RESULTADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

As **Tabelas 10 e 11** apresentam os resultados dos ensaios de fadiga em quatro pontos das misturas da Faixa III DERSA com agregados das pedreiras Pombal e Jambeiro, respectivamente. As **Tabelas 12 e 13** apresentam os resultados dos ensaios das misturas GAP GRADED com agregados das pedreiras Jambeiro e Pombal, respectivamente.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de fadiga em quatro pontos das misturas da Faixa III DERSA JBR

Parâmetros	P21 = 114			P22 = 214			P23 = 314			P24 = 414		
	8,0E+04	2,2E+04	4,0E+03	2,7E+06	1,5E+05	2,5E+04	7,0E+04	2,1E+04	4,4E+03	4,8E+05	2,4E+04	4,9E+03
Ciclos, N												
Deformação, µε	300	450	600	300	450	600	301	450	600	300	450	600
Tensão, kPa	2.000	2.822	3.389	943	1.406	1.612	1.279	2.007	3.199	1.631	2.428	2.879
Rigidez à flexão, MPa	13.338	12.544	11.296	6.297	6.253	5.376	8.509	8.925	10.661	10.877	10.798	9.613
Módulo Dinâmico, MPa	7.083	6.661	5.999	3.346	3.323	2.857	4.522	4.743	5.665	5.780	5.738	5.108
Ângulo de fase, graus	22,0	-154,3	-151,4	-136,0	-136,1	-95,4	-34,6	-91,7	-153,1	-34,1	-150,3	-152,2
Energia Dissipada, kPa	1,36	2,86	4,62	0,64	1,43	2,15	0,88	2,08	4,36	1,11	2,50	3,94
Energia Dissipada Acumulada, kPa	1.397	774	232	19.190	2.314	593	783	484	241	6.424	755	234
Temperatura, °C	20,2	20,2	20,3	20,4	20,2	20,3	20,2	20,3	20,3	20,2	20,2	20,2
Carga Aplicada, kN	0,93	1,31	1,59	0,45	0,67	0,77	0,61	0,95	1,52	0,78	1,15	1,37
Carga Máxima, kN	0,59	0,64	0,91	0,23	0,31	0,36	0,33	0,48	0,84	0,35	0,63	0,66
Carga Mínima, kN	-0,35	-0,67	-0,67	-0,22	-0,36	-0,41	-0,28	-0,48	-0,68	-0,43	-0,52	-0,71
Deflexão da viga, mm	0,16	0,24	0,32	0,16	0,24	0,32	0,16	0,24	0,32	0,16	0,24	0,32
LVDT Máximo	0,0739	0,0869	0,1646	0,0765	0,1175	0,1959	0,1141	0,1306	0,1559	0,0920	0,1234	0,1976
LVDT Mínimo	-0,0057	-0,0326	0,0055	-0,0025	-0,0012	0,0377	0,0347	0,0119	-0,0025	0,0129	0,0048	0,0395

Tabela 11 - Resultados dos ensaios de fadiga em quatro pontos das misturas da Faixa III DERSA PBL

Parâmetros	P09 = 124			P10 = 224			P11 = 324			P12 = 424		
	1,9E+05	1,7E+04	4,0E+03	1,5E+06	3,1E+05	1,3E+04	2,3E+05	2,6E+04	2,6E+04	3,1E+05	4,9E+04	1,2E+04
Ciclos, N	300	451	600	300	450	601	300	450	600	300	450	600
Deformação, $\mu\epsilon$	1.512	2.128	2.568	877	1.280	1.558	1.164	1.657	2.186	1.211	1.928	2.391
Tensão, kPa	10.088	10.442	9.301	5.843	6.323	5.819	7.763	7.324	7.649	8.084	8.617	8.324
Rigidez à flexão, MPa	5.361	5.018	4.551	3.105	3.022	2.754	4.125	3.914	3.875	4.296	4.560	4.234
Módulo Dinâmico, MPa	-21,7	-154,3	-155,8	-141,4	-86,3	34,6	-20,6	-152,5	-155,7	-63,2	-153,6	-153,6
Ângulo de fase, graus	1,03	2,19	3,48	0,60	1,31	2,02	0,80	1,71	2,97	0,84	1,96	3,24
Energia Dissipada, kPa	2.424	463	177	9.180	4.713	323	2.444	536	907	3.505	1.087	468
Energia Dissipada Acumulada, kPa	20,1	20,1	20,1	20,2	20,1	20,2	20,1	20,0	20,1	20,2	20,1	20,1
Temperatura, °C	0,72	1,01	1,22	0,42	0,61	0,74	0,55	0,79	1,04	0,58	0,92	1,14
Carga Aplicada, kN	0,47	0,54	0,65	0,21	0,27	0,37	0,30	0,43	0,49	0,27	0,49	0,59
Carga Máxima, kN	-0,24	-0,47	-0,57	-0,21	-0,33	-0,37	-0,26	-0,36	-0,55	-0,31	-0,42	-0,55
Carga Mínima, kN	0,16	0,24	0,32	0,16	0,24	0,32	0,16	0,24	0,32	0,16	0,24	0,32
Deflexão da viga, mm	0,0870	0,1156	0,1561	0,0797	0,1199	0,1625	0,0808	0,1753	0,1586	0,0799	0,1214	0,1563
LVDT Máximo	0,0079	-0,0033	-0,0021	0,0005	0,0011	0,0038	0,0017	0,0565	0,0004	0,0008	0,0028	-0,0020
LVDT Mínimo												

Tabela 12 - Resultados dos ensaios de fadiga em quatro pontos das misturas GAP GRADED JBR

Parâmetros	P29 = 115			P30 = 215			P31 = 315			P32 = 415		
	1,1E+05	1,2E+04	5,1E+03	2,7E+06	7,9E+04	3,3E+04	3,8E+05	5,2E+04	9,5E+03	8,4E+05	5,4E+04	8,6E+03
Ciclos, N	300	450	600	300	450	600	300	449	600	300	450	600
Deformação, $\mu\epsilon$	1581	2201	2982	904	1194	1731	1163	1554	1991	1411	1899	2325
Tensão, kPa	10535	9787	9942	6.028	5.302	5.767	7.750	6.920	6.642	9.411	8.436	7.747
Rigidez à flexão, MPa	5598	5201	5284	3.203	2.818	3.065	4.118	3.677	3.530	5.001	4.483	4.117
Módulo Dinâmico, MPa	-93,8	-155,3	-155,2	-139,2	-138,7	-8,8	-90,3	-149,9	-89,7	-16,9	-148,7	-149,5
Ângulo de fase, graus	1,06	2,24	4,06	0,61	1,21	2,29	0,80	1,57	2,67	2,53	1,95	3,16
Energia Dissipada, kPa	1466	344	254	17.356	1.070	872	3.909	970	310	9.614	1.222	341
Energia Dissipada Acumulada, kPa	20,2	20,4	20,4	20,2	20,0	20,1	20,0	20,0	20,3	20,1	20,1	20,1
Temperatura, °C	0,74	1,03	1,40	0,42	0,56	0,81	0,54	0,73	0,93	0,66	0,89	1,09
Carga Aplicada, kN	0,35	0,49	0,66	0,21	0,27	0,50	0,28	0,34	0,49	0,29	0,41	0,52
Carga Máxima, kN	-0,39	-0,54	-0,73	-0,22	-0,28	-0,31	-0,26	-0,39	-0,45	-0,37	-0,48	-0,57
Carga Mínima, kN	0,16	0,24	0,32	0,16	0,24	0,32	0,16	0,24	0,32	0,16	0,24	0,32
Deflexão da viga, mm	0,0796	0,1188	0,1570	0,0775	0,1203	0,1354	0,0747	0,1433	0,1566	0,0797	0,1185	0,1595
LVDT Máximo	0,0004	0,0001	-0,0013	-0,0017	0,0015	-0,0230	-0,0046	0,0248	-0,0016	0,0006	-0,0003	0,0011
LVDT Mínimo												

Tabela 13 - Resultados dos ensaios de fadiga em quatro pontos das mistura GAP GRADED PBL

Parâmetros	P25 = 125			P26 = 225			P27 = 325			P28 = 425		
	7,E+04	1,E+04	3,E+03	7,E+05	5,E+04	5,E+03	2,E+05	4,E+04	7,E+03	4,E+05	3,E+04	7,E+03
Ciclos, N	7,E+04	1,E+04	3,E+03	7,E+05	5,E+04	5,E+03	2,E+05	4,E+04	7,E+03	4,E+05	3,E+04	7,E+03
Deformação, $\mu\epsilon$	300	450	600	299	450	600	300	450	600	300	450	600
Tensão, kPa	1463	2108	2296	798	1254	1454	1223	1953	2202	1523	1736	2024
Rigidez à flexão, MPa	4881	4689	3825	5331	5575	4847	8152	8684	7337	10166	7710	6739
Módulo Dinâmico, MPa	5188	4983	4065	2834	2963	2576	4332	4615	3899	5402	4097	3581
Ângulo de fase, graus	-36	-155	-156	-146	-146	-89	-33	-151	-155	-36	-153	-151
Energia Dissipada, kPa	0,99	2,16	3,15	0,54	1,31	1,99	0,84	2,02	3,03	1,03	1,78	2,78
Energia Dissipada Acumulada, kPa	84	40	11	403	266	132	207	153	139	475	316	219
Temperatura, °C	19,9	20,6	20,5	20,5	19,9	19,4	20,1	20,7	20,3	20,2	20,4	20,2
Carga Aplicada, kN	0,70	1,00	1,09	0,38	0,60	0,69	0,58	0,93	1,05	0,72	0,83	0,96
Carga Máxima, kN	0,35	0,48	0,56	0,18	0,31	0,37	0,33	0,45	0,48	0,38	0,43	0,49
Carga Mínima, kN	-0,35	-0,52	-0,53	-0,20	-0,29	-0,32	-0,25	-0,48	-0,56	-0,35	-0,40	-0,47
Deflexão da viga, mm	0,16	0,24	0,32	0,16	0,24	0,32	0,16	0,24	0,32	0,16	0,24	0,32
LVDT Máximo	0,0813	0,1161	0,1560	0,0820	0,1194	0,1600	0,0782	0,1208	0,1605	0,0849	0,1227	0,1569
LVDT Mínimo	0,0022	-0,0025	-0,0024	0,0033	0,0007	0,0018	-0,0009	0,0021	0,0020	0,0058	0,0038	-0,0016

As curvas de vida de fadiga obtidas pelo ensaio de viga apoiada em quatro pontos foram traçadas para as misturas asfálticas P09, P10, P11 e P12 (Faixa III da DERSA) e P25, P26, P27 e P28 (GAP GRADED) com agregados da pedra Pombal e para as misturas P21, P22, P23 e P24 (Faixa III da DERSA) e P29, P30, P31 e P32 (GAP GRADED), com agregados da pedra Jambeiro. Estas curvas são mostradas nas **Figuras 36, 37, 38 e 39** com seus respectivos modelos de fadiga.

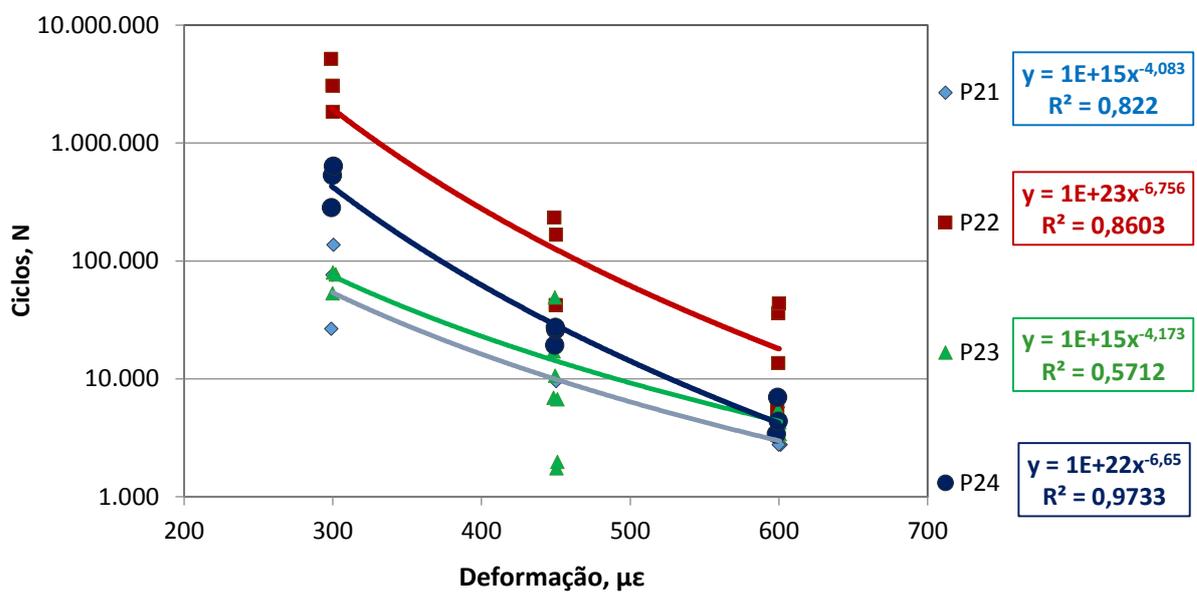


Figura 36 - Curvas de fadiga e respectivos modelos gerados após ensaios de fadiga em quatro pontos das misturas da Faixa III DERSA, P21, P22, P23 e P24 com agregados da pedra Jambeiro.

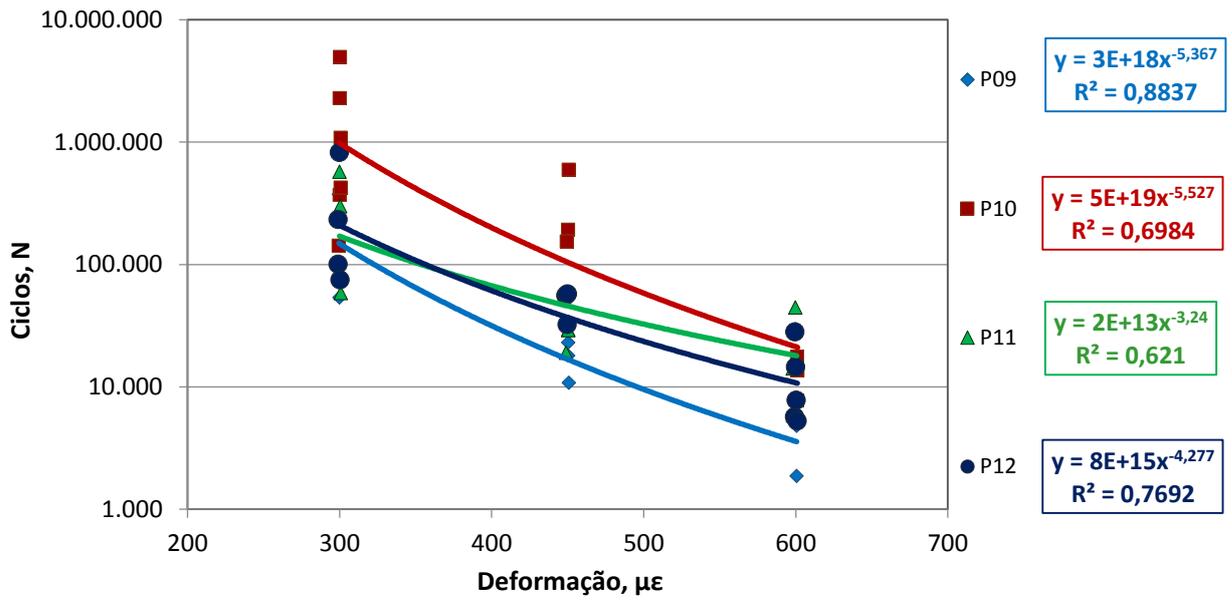


Figura 37 - Curvas de fadiga e respectivos modelos gerados após ensaios de fadiga em quatro pontos das misturas da Faixa III DERSA, P09, P10, P11 e P12, com agregados da pedra Pombal.

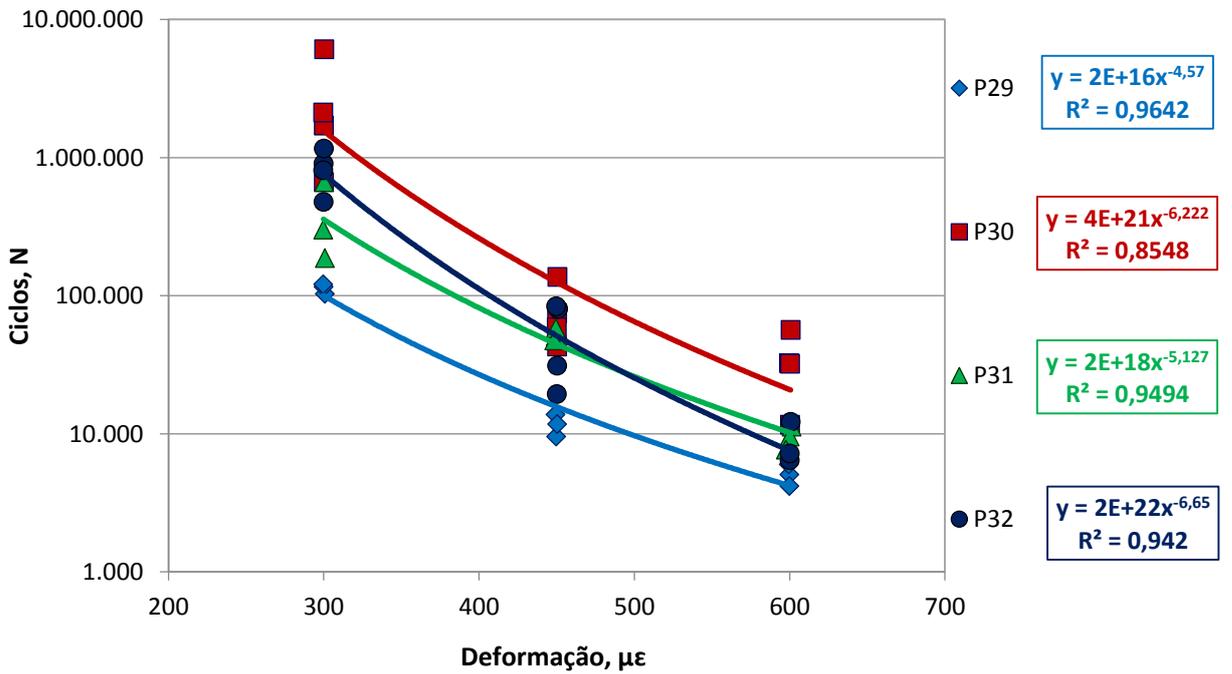


Figura 38 - Curvas de fadiga e respectivos modelos gerados após ensaios de fadiga em quatro pontos das misturas GAP GRADED, P29, P30, P31 e P32, com agregados da pedra Jambeiro.

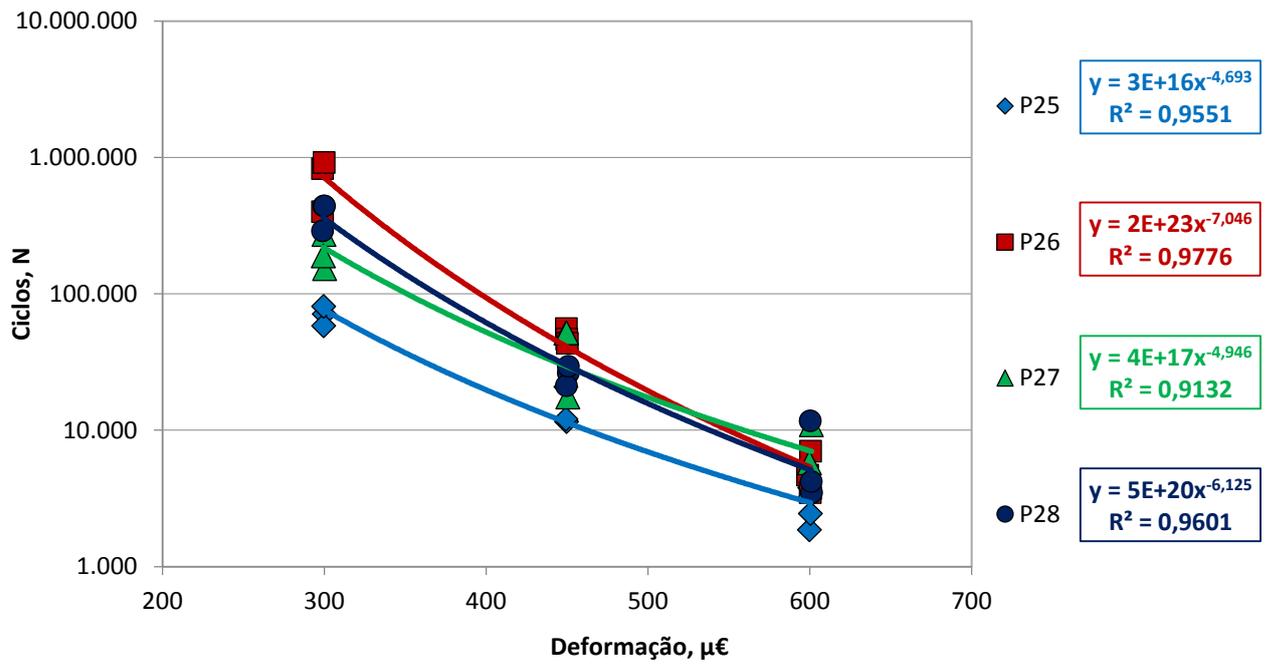


Figura 39 - Curvas de fadiga e respectivos modelos gerados após ensaios de fadiga em quatro pontos das misturas GAP GRADED, P25, P26, P27 e P28, com agregados da pedraira Pombal.

As curvas de fadiga obtidas por meio do ensaio de quatro pontos mostraram que as misturas com o asfalto borracha (P22, P11, P30 e P26) apresentaram comportamento bem superior às outras e que as misturas com CAP 30/45 (P21, P09, P29 e P25) obtiveram o pior desempenho. A mistura com o CAP polímero 60/85 (P23) e agregados da pedra Jambreiro teve comportamento bem parecido com a produzida com o CAP 30/45 (P21). No caso da mistura com o CAP polímero 60/85 (P11) e agregado da pedra Pombal, quando aplicadas deformações mais baixas o comportamento foi similar ao do CAP 30/45, enquanto para deformações mais elevadas o comportamento foi parecido ao da mistura com asfalto borracha. Quanto à mistura produzida com o CAP modificado com SBS e agregados da pedra Jambreiro se nota um comportamento curioso, já que para menores deformações ele tendeu a se aproximar ao comportamento da mistura com borracha e que com maiores deformações seu comportamento se aproximou aos dos outros ligantes. No caso da mistura com o CAP modificado com SBS e agregados da pedra Pombal o comportamento foi intermediário, ficando entre as curvas do asfalto borracha e do CAP 30/45.

As misturas P22 e P10 com asfalto borracha são a de maior teor de ligante e, conseqüentemente, a de menor relação filler/asfalto, o que contribuiu para um comportamento bem superior aos das outras misturas. Por conta deste aspecto, foi notada uma certa segregação das misturas P21, P23 e P24 durante a moldagem das vigotas, fato não percebido na mistura P22.

Nas **Figuras 40 e 41** são mostrados os gráficos com as médias dos valores de rigidez à flexão das misturas da Faixa III DERSA, P21, P22, P23 e P24 com agregados da pedra Jambreiro, e das misturas P09, P10, P11 e P12 com agregados da pedra Pombal, respectivamente. As **Figuras 42 e 43** mostram os valores médios de rigidez à flexão das misturas GAP GRADED, P29, P30, P31 e P32 com agregados da pedra Jambreiro, e das misturas P25, P26, P27 e P28 com agregados da pedra Pombal, respectivamente.

Observando os resultados apresentados nos gráficos, pode-se verificar que as misturas com CAP30/45 (P21, P9 e P29) são as mais rígidas e que as misturas com asfalto borracha (P22, P10 e P30) são as mais flexíveis, o que ajuda a explicar seu melhor comportamento à fadiga.

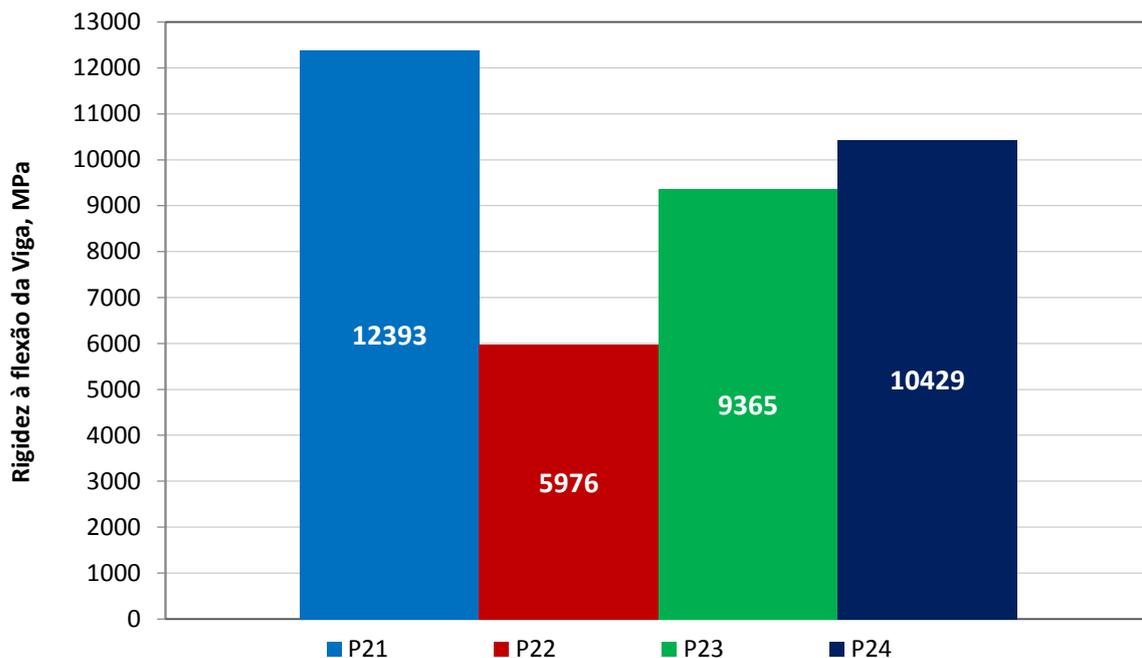


Figura 40 - Média da rigidez à flexão a 20°C e 10 Hz das misturas da Faixa III DERSA, P21, P22, P23 e P24 com agregados da pedreira Jambeiro.

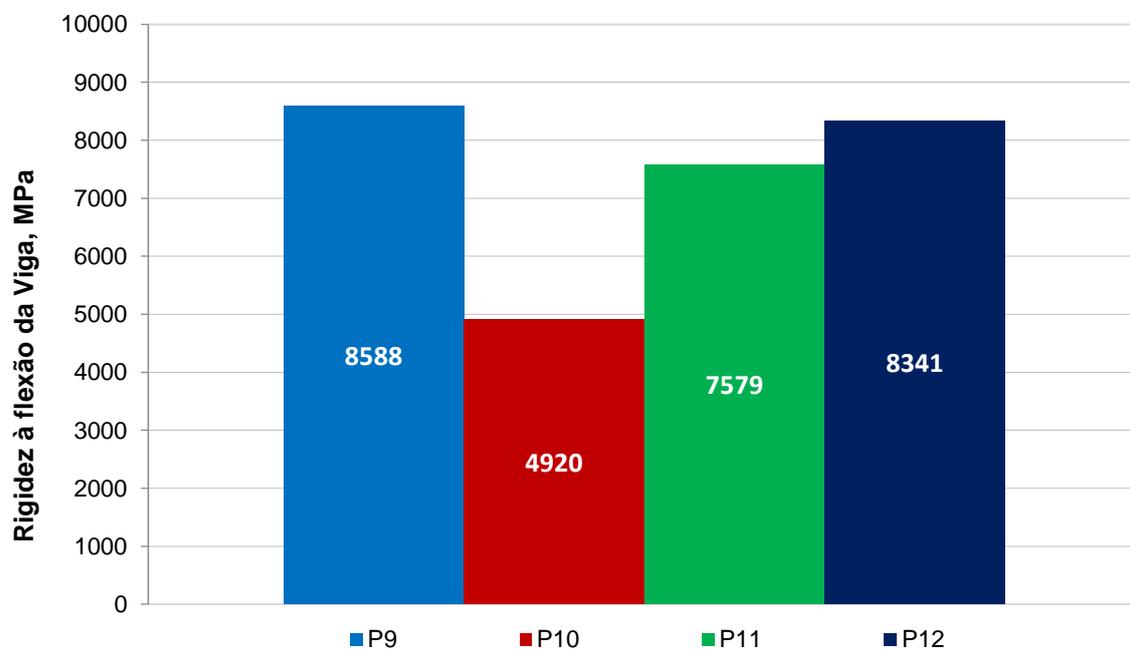


Figura 41 - Média da rigidez à flexão a 20°C e 10 Hz das misturas da Faixa III DERSA, P09, P10, P11 e P12 com agregados da pedreira Pombal.

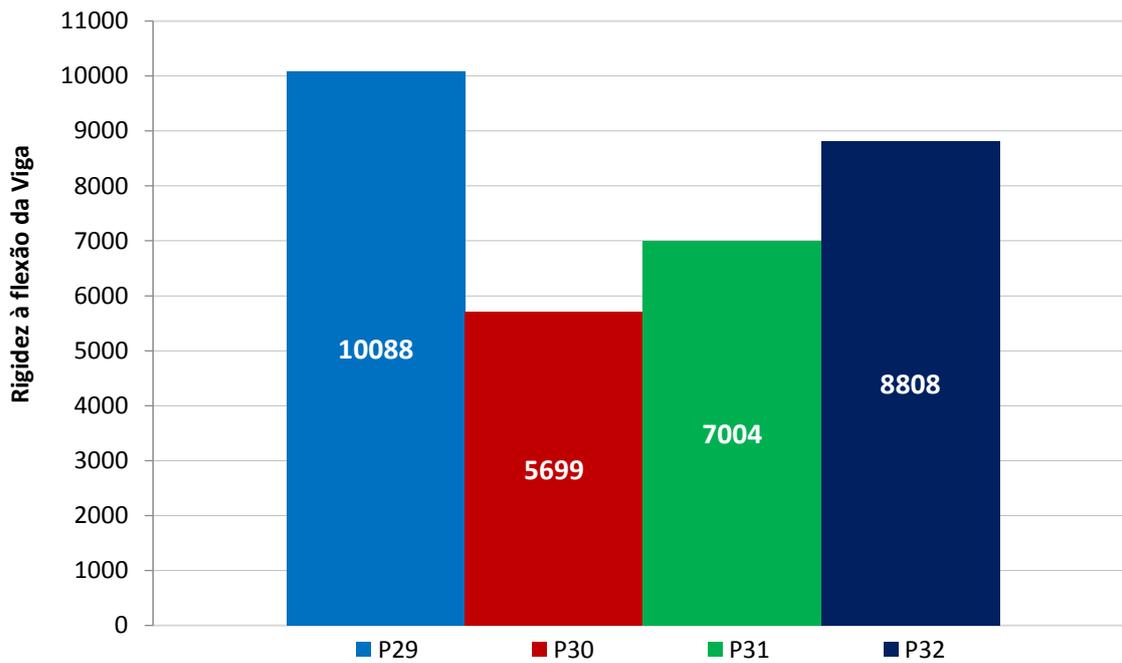


Figura 42 - Média da rigidez à flexão a 20°C e 10 Hz das misturas GAP GRADED, P29, P30, P31 e P32 com agregados da pedra Jambeiro.

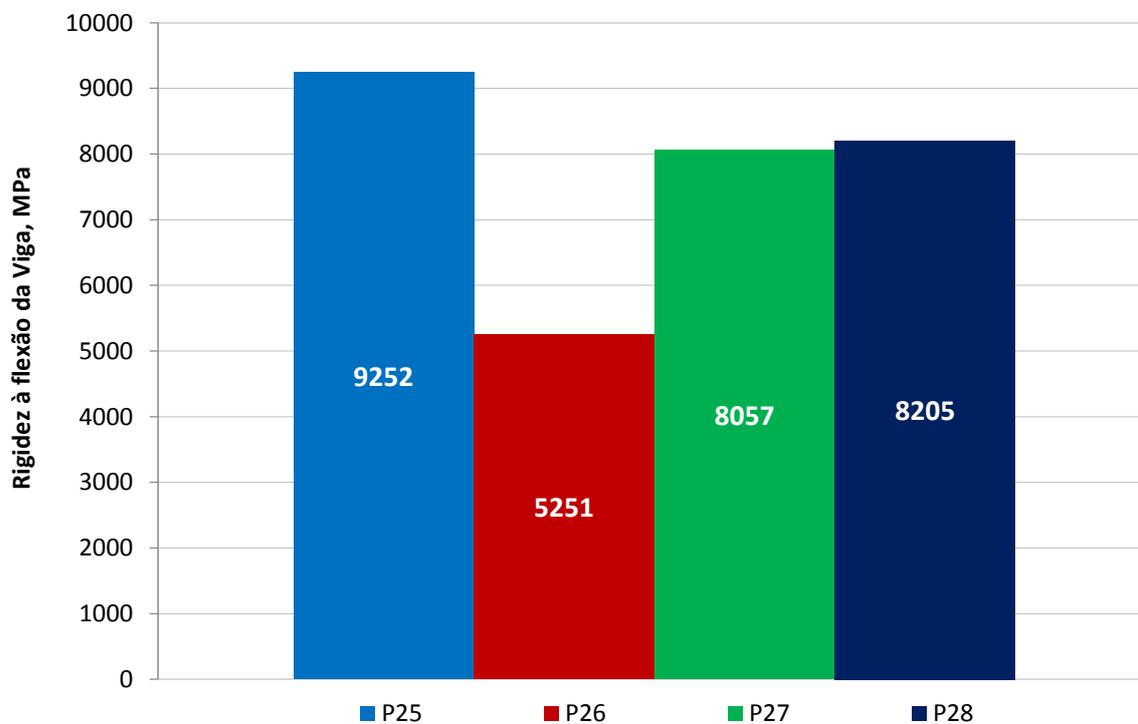


Figura 43 - Média da rigidez à flexão a 20°C e 10 Hz das misturas GAP GRADED, P25, P26, P27 e P28 com agregados da pedra Pombal.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

6.1 Considerações Finais

Os resultados dos ensaios de fadiga em quatro pontos mostraram que o tipo de ligante e o teor influenciam diretamente na vida de fadiga, já que a mistura tende a ficar mais flexível. A rigidez a flexão da mistura com CAP 30/45, que apresentou o pior desempenho a fadiga, é mais que o dobro da rigidez da mistura com asfalto borracha, o que indica que cargas maiores foram aplicadas na mistura com CAP30/45 para atingir a mesma deformação da mistura com asfalto borracha.

Já as misturas com CAP polímero 60/85 combinados com os agregados da pedra Jambreiro teve um comportamento similar ao da produzida com o CAP 30/45. Já a mistura com CAP polímero 60/85 com o agregado da pedra Pombal teve um comportamento ruim a deformações mais baixas, enquanto que em altas deformações, obteve resultados melhores, parecidos com as misturas com asfalto borracha. Isso se deve ao fato de que os ligantes modificados com polímeros costumam ter um comportamento mais flexível, fazendo com que a sua vida de fadiga seja maior.

6.2 Sugestão de Trabalhos Futuros

As principais sugestões para trabalhos futuros são:

- Ensaios de deformação permanente para a definição da mistura com o melhor comportamento em relação aos dois maiores defeitos em pavimentos;
- Ensaio de Fadiga de Viga em Quatro Pontos em diferentes temperaturas e frequências;
- Ensaio de Fadiga Convencional com corpo de prova cilíndrico por compressão diametral, para a comparação entre os dois ensaios.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADHIKARI, S.; YOU, Z. *Fatigue Evaluation of Asphalt Pavement using Beam Fatigue Apparatus*, The Technology Interface Journal, Volume 10, Nº3, ISSN # 1523-9926, Spring 2010.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; *et al.* *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*, 1ª Edição PETROBRAS/ABEDA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- CARPENTER, S.H.; GHUZLAN, K.A.; SHEN, S. *A Fatigue Endurance Limit for Highway and Airport Pavements*. Proceedings Highway Research Board, Washington, 2003.
- CAVALCANTI, L. S. *Efeito de Alguns Modificadores de Ligantes na Vida de Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas*. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 177 p., 2010.
- DI BENEDETTO, H. & DE LA ROCHE, C. *State of the Art on Stiffness Modulus and Fatigue of Bituminous Mixtures*. RILEM Report 17. Bituminous Binders and Mixes. Brussels, Belgium, 1998.
- EPPS, J.A.; MONISMITH, C.L. *Influence of Mixture Variables on the Flexural Fatigue Properties of Asphalt Concrete*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 38, 1969.
- FONTES, L. P. T. L. *Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos*. Tese de Doutorado. Universidade do Minho. Universidade Federal de Santa Catarina. 545 p., 2009.
- MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. *Mecânica dos Pavimentos*. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ, 2005.
- MONISMITH, C.L.; EPPS J.A.; KASIANCHUK A.; MCLEAN D.B. *Asphalt Mixture Behaviour on Repeated Flexure*. Report No. TE 70-5, University of California, Berkeley, USA, 1971.
- PREUSSLER, E.S. & PINTO, S. *Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis*. Editora Copiarte. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1991.
- PRONK, A. C. *Collaborative study with 4BP device in Europe. "Round Robin test with three reference beams"*. Preliminary Results. 2º Workshop on Four Bending Point, University of Minho, ISBN 978-972-8692-42-1, 2009.

RODRIGUES, R.M. *Estudo do Trincamento dos Pavimentos*. 1991. Tese (Doutorado) - Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

Sistema Nacional de Viação, SNV, Departamento Nacional do Transporte, DNIT, Boletim Rodoviário, 2012 (<http://www.dnit.gov.br/>)

WAY, G.B.; KALOUSH, K. E.; SOUZA, J. M.; *et al.* *Arizona's 15 Years of Experience Using the Four Bending Beam Test*. 2º Workshop on Four Bending Point, University of Minho, ISBN 978-972-8692-42-1, 2009.

ANEXO 1

Exemplo de Relatório do ensaio de fadiga de viga em quatro pontos

Mistura da Faixa III DERSA – Agregados da pedra JAMBEIRO

