



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
ENGENHARIA CIVIL

RAUL SERAFIM PONTE

AVALIAÇÃO DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OBTENÇÃO DO
MÓDULO DE RESILIÊNCIA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

FORTALEZA
2013

RAUL SERAFIM PONTE

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OBTENÇÃO DO
MÓDULO DE RESILIÊNCIA DE MISTURAS ASFÁLTICAS**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará como requisito para obtenção do Título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof^a. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D.

FORTALEZA

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

P857a Ponte, Raul Serafim.
Avaliação de diferentes metodologias para obtenção do módulo de resiliência de misturas asfálticas
/ Raul Serafim Ponte. – 2013.
78 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de
Departamento de Engenharia de Transportes, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2013.
Orientação: Prof. PhD. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco.

1. Pavimento. 2. Mistura asfáltica – rigidez. 3. Construção civil – normas. I. Título.

CDD 620

RAUL SERAFIM PONTE

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OBTENÇÃO DO
MÓDULO DE RESILIÊNCIA DE MISTURAS ASFÁLTICAS**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará como requisito para obtenção do Título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof^a. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D.

Aprovada em: 15/02/2013

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D. (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Aurea Silva de Holanda, D.Sc. (Avaliadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D. (Avaliador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A meus avós, Raul e Zeneida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus avós, Raul e Zeneida, pelo apoio emocional, dedicação e confiança em mim investidos. Por terem sempre acreditado e me apoiado em todos meus planos e projetos. Obrigado por tudo.

À minha namorada Ticiany, pelo amor e companheirismo nos melhores e nos piores momentos. Obrigado pela paciência, pelos conselhos e por ter sido meu amor e minha amiga em todos esses anos que estamos juntos. Te amo.

Ao meu pai, Flávio e meu irmão, Flavinho, pelo carinho, apoio, cumplicidade e por serem acima de tudo, meus grandes amigos.

A minha mãe, Lia e minha irmã, Natália. Por tudo, mesmo que estejam distantes.

A professora Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, por ser um exemplo de pessoa e de profissional, além de uma orientadora dedicada, atenciosa e amiga (Que sorte eu tive!). Obrigado por ter acreditado em mim, me ajudado e me guiado nessa caminhada árdua, sem você eu não teria conseguido.

À professora Aurea Silva de Holanda, que teve participação fundamental na análise dos resultados deste trabalho. Muito obrigado!

Aos professores que me guiaram durante minha graduação, em especial ao professor Jorge Barbosa Soares, que pela habilidade de encantar enquanto leciona me fez mais um apaixonado pela área da pavimentação.

Ao pessoal do LMP/DET por ter feito dos meus dias de faculdade mais felizes. Em especial ao meu grande amigo Rômulo Jácome, pela amizade, companheirismo e pelo apoio incondicional pro que quer que fosse necessário para a realização desse trabalho. E para os amigos que lá conquistei e pretendo levar para minha vida: Luquinhas, Renato, Manu, Reuber, Lorrán, Annie, Iuri, Felipe, Fernando, Annie, Camila, Márcio, Jardel, Alessandra, Victor e todo pessoal que não foi citado aqui (é muita gente!), vocês conseguiram fazer o tempo que passei na Universidade muito mais prazeroso!

Aos meus amigos Pedro, Lucas, Felipe, Pif, Matheus e Leo. Com vocês ao meu lado eu sei que nunca vou estar sozinho.

A minha cadelinha Lola, pelo amor incondicional que só os cães são capazes de dar.

E por fim, ao Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH31-ANP pelo apoio na forma da bolsa de iniciação científica.

RESUMO

O Módulo de Resiliência (MR) é um dos principais parâmetros utilizados para o dimensionamento empírico-mecânico de pavimentos asfálticos no Brasil, mesmo que não seja reconhecidamente o mais adequado para a caracterização de rigidez de misturas asfálticas, que são materiais viscoelásticos. Foi publicada recentemente no Brasil uma nova norma para a obtenção desse parâmetro, a NBR 16018 (2011) da ABNT, baseada nas principais normativas internacionais para o ensaio, como as normas ASTM D4123 (1995) e AASHTO TP-31 (1996). O texto da nova norma é bem mais detalhado do que o da norma em vigor no Brasil até então, DNIT ME 135 (2010), havendo também divergências nas recomendações para o ensaio entre essas normas. Foram realizados ensaios para obtenção do MR em laboratório utilizando diferentes metodologias, entre elas as normativas brasileiras. Foram avaliados três misturas do tipo Concreto Asfáltico (CA) com diferentes materiais e curvas granulométricas. Observou-se que houve pouca variação na média dos resultados obtidos, entretanto, foi possível avaliar uma maior sensibilidade dos resultados com relação ao parâmetro temperatura. O impacto da diferença obtida nos resultados dos ensaios realizados com diferentes metodologias foi avaliado através da análise de tensões e de deformações de uma dada estrutura com o auxílio do *software* CAP3D. A partir desta análise, pode-se observar que, para a estrutura avaliada, com revestimento do tipo CA, houve pouca influência da metodologia utilizada para a obtenção do MR nos resultados obtidos de tensões e de deformações, que estão relacionadas ao desempenho do pavimento em relação à fadiga e à deformação permanente, apresentando normalmente variação da ordem de 1% nos resultados encontrados. Concluiu-se que a variação dos resultados obtidos a partir da utilização de cada metodologia de ensaio não é significativa. Porém, o uso da norma NBR 16018 (2011) da ABNT gerou resultados menos sensíveis às variáveis das misturas avaliadas nesse trabalho, o que contribuiu para a redução da variabilidade dos resultados obtidos em decorrência da maior especificidade dos procedimentos de ensaio e do processamento dos dados.

Palavras chave: Pavimentos. Misturas asfálticas. Módulo de resiliência. Normas. Análise de pavimentos.

ABSTRACT

The Resilient Modulus (MR) is one of the main parameters used for the mechanistic-empirical design of flexible pavements in Brazil, even though it is acknowledged that is not the most suitable way for the characterization of stiffness of asphalt mixtures, which are viscoelastic materials. It was recently published in Brazil a new standard for determining this parameter, the ABNT NBR 16018 (2011), based on the main international standards, such as ASTM D4123 (1995) and AASHTO TP-31 (1996). The new standard is more accurate than the one used in Brazil until then, DNIT ME 135 (2010). Many divergences on the recommendations for the test procedures on both standards were found. Tests for obtaining MR were performed in laboratory using different methodologies, including the Brazilian normatives. Three different Asphalt Concrete (AC) mixtures were evaluated, with different materials and size distribution curves. It was observed that there was little variation in the average of the results obtained. However, it was observed a greater sensitivity of the results regarding the temperature parameter. The impact of the difference in the results obtained from tests performed with different methods was assessed by stress and strain analysis of a given structure using the software CAP3D. From this analysis, it was observed that for the structure evaluated, there was little influence of the methodology used for the MR test on the stresses and strains obtained on the analysis, associated with pavement performance related to fatigue and permanent deformation. The average variation of the results found in the analysis was 1%. It was concluded that the variation of the results obtained from the use of each test methodology is not significant. However, the use of NBR 16018 (2011) ABNT generated results less mixture dependent, which contributes to reduce the variability of results, due to the greater specificity on the recommendations for the test procedures and the data processing.

Keywords: Pavements. Asphalt mixtures. Resilient modulus. Standards. Pavement Analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Pavimento rígido - Corte (Bernucci <i>et al.</i> , 2007)	6
Figura 2: Pavimento flexível - Corte (Bernucci <i>et al.</i> , 2007).....	7
Figura 3: Área de distribuição de cargas – Pavimentos flexíveis e rígidos.....	8
Figura 4: Ensaio para análise de deformabilidade em misturas asfálticas (Brito, 2006).....	10
Figura 5: Estados de tensões típicos em uma camada de concreto asfáltico submetido à uma carga de roda – Adaptado de Roque e Buttlar (1992) <i>apud</i> Brito (2006).....	11
Figura 6: Ciclo de aplicação de cargas, período de descanso e curva de deslocamento durante o ensaio de MR (Bernucci <i>et al.</i> , 2007).....	14
Figura 7: Parcela recuperável e permanente da curva de deslocamento para o ensaio de MR (Bernucci <i>et al.</i> , 2007).....	15
Figura 8: Desenho esquemático do comportamento viscoelástico dos materiais (Medeiros, 2006).....	18
Figura 9: Curva mestra para o ensaio de módulo dinâmico (Theisen, 2011).....	18
Figura 10: Esquema de ensaio de módulo dinâmico por compressão axial (Coutinho, 2009).....	19
Figura 11: Corpo-de-prova com núcleo central extraído (Bernucci <i>et al.</i> , 2007)	20
Figura 12: Comparação entre as curvas de tensão e de deformação obtidas através de ensaios de (a) MD e (b) MR – Adaptado de Hu <i>et al.</i> (2008)	21
Figura 13: Comparação entre a magnitude das deformações obtidas durante os ensaios de MR e MD Adaptado de Hu <i>et al.</i> (2008).....	22
Figura 14: Curva granulométrica dos agregados e da Mistura 1 – Adaptado de (Coutinho, 2012).....	27
Figura 15: Curva granulométrica dos agregados e das Mistura 2 e 3 – Adaptado de (Coutinho, 2012).....	28
Figura 16: Esquema de posicionamento dos LVDTs no ensaio de MR.....	33

Figura 17: Representação gráfica da divisão do pulso de deslocamento (Bernucci <i>et al.</i> , 2007).....	36
Figura 18: Definições de deslocamento instantâneo e total para o cálculo do MR para misturas asfálticas – Adaptado de Bernucci <i>et al.</i> (2007)	36
Figura 19: Gráfico de barras - Resumo dos resultados de MR obtidos em prensa pneumática.....	39
Figura 20: Pavimento padrão	41
Figura 21: Gráfico de barras - Análise do deslocamento vertical (mm) na superfície do revestimento	44
Figura 22: Gráfico de barras - Análise da tensão de tração (MPa) na face inferior do revestimento	44
Figura 23: Gráfico de barras - Análise da tensão de compressão no topo do subleito.....	45
Figura B1: Equipamentos da UTM-25 da IPC Global - Adaptado do panfleto comercial da empresa.....	60
Figura B2: Aparato para montagem do CP durante o ensaio de MR.....	61
Figura B3: Interface do programa UTS003 para o ensaio de MR para misturas asfálticas na UTM-25	62
Figura B4: Curva de deslocamento de um ensaio de MR em misturas asfálticas – Adaptado de IPC GLOBAL (2006).....	63
Figura B5: Equações utilizadas para processamento dos dados no programa UTS003 – Adaptado de IPC GLOBAL (2006).....	64
Figura B6: Curva de deslocamento de um ensaio de MR realizado na UTM-25	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização dos agregados – Adaptada de Coutinho (2012).....	27
Tabela 2: Parâmetros de dosagem	29
Tabela 3: Principais recomendações das metodologias selecionadas.....	32
Tabela 4: Resultados de MR – Prensa pneumática: Metodologia SIGEO	37
Tabela 5: Resultados de MR – Prensa pneumática: ABNT NBR 16018 (2011).....	37
Tabela 6: Resultados de MR – Prensa pneumática: DNER ME 133 (1994).....	38
Tabela 7: Resumo dos resultados de MR (MPa) obtidos em prensa pneumática	38
Tabela 8: Comparação dos resultados de MR (MPa) obtidos através do uso das SIGEO e ABNT NBR 16018 (2011)	40
Tabela 9: Coeficientes de variação dos resultados de MR encontrados para cada mistura nas metodologias estudadas.....	40
Tabela 10: Análise do deslocamento vertical (mm) na superfície do revestimento.....	43
Tabela 11: Análise da tensão de tração (MPa) na face inferior do revestimento.....	43
Tabela 12: Análise da tensão de compressão (MPa) no topo do subleito	43
Tabela A1: Recomendações para o ensaio de MR de misturas asfálticas das principais normas nacionais e internacionais	57
Tabela A1: Recomendações para o ensaio de MR de misturas asfálticas das principais normas nacionais e internacionais (continuação).....	58
Tabela A1: Recomendações para o ensaio de MR de misturas asfálticas das principais normas nacionais e internacionais (continuação).....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional de Petróleo
AS	<i>Australian Standards</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BSi	<i>British Standards</i>
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CGS	Compactador Giratório Superpave
CP	Corpo de prova
CV	Coefficiente de Variação
DMT	Densidade máxima teórica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
Gmm	Densidade específica Rice
IFFSTAR	<i>Institut Français des Sciences et Technologies des Transports</i>
Lubnor	Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste
MD	Módulo Dinâmico
MR	Módulo de Resiliência

NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
prEN	<i>European Standard</i>
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
RT	Resistência à Tração
Superpave	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará
UTM-25	<i>Universal Testing Machine 25</i>
V _v	Volume de vazios
WLF	William-Landel-Ferry

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA	3
1.2. QUESTÕES DE PESQUISA.....	4
1.3. OBJETIVOS	4
1.3.1. Objetivo geral	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. PAVIMENTO.....	6
2.2. DEFORMABILIDADE DE PAVIMENTOS.....	8
2.3. MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR).....	11
2.4. MÓDULO DINÂMICO (MD)	16
2.5. RELAÇÃO ENTRE MÓDULO DE RESILIÊNCIA E MÓDULO DINÂMICO	21
2.6. MÉTODOS PARA DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1. MATERIAIS UTILIZADOS.....	26
3.2. DOSAGEM E REPLICAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	28
3.3. ESCOLHA DAS METODOLOGIAS DE ENSAIO DE MR	29
3.4. ENSAIOS DE MR.....	32
3.5. TRATAMENTO DOS RESULTADOS PROVENIENTES DOS ENSAIOS DE MR	34
4. RESULTADOS E ANÁLISES	37
4.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MR.....	37
4.2. O IMPACTO DO USO DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OBTENÇÃO DO MR NA ANÁLISE DE UM PAVIMENTO PADRÃO.....	41

5. CONCLUSÕES.....	46
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	47
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
APÊNDICE A – TABELA COMPARATIVA DAS PRINCIPAIS NORMAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS PARA O ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA MISTURAS ASFÁLTICAS	57
APÊNDICE B – PRINCÍPIOS DO FUNCIONAMENTO E METODOLOGIA DO TRATAMENTO DE DADOS DO EQUIPAMENTO UNIVERSAL TESTING MACHINE (UTM-25) DA IPC GLOBAL PARA O ENSAIO DE MR PARA MISTURAS ASFÁLTICAS.....	60

1. INTRODUÇÃO

A malha viária pavimentada do Brasil representa uma importante fração do patrimônio do país, e é em sua maioria formada por pavimentos asfálticos. Inúmeras pesquisas são realizadas com o intuito de se aprimorar o desempenho e serventia deste tipo de estrutura, principalmente da camada de revestimento, devido ao seu elevado custo em relação às outras camadas do pavimento. Um dos principais avanços nesse sentido é a evolução de metodologias de dimensionamento puramente empíricas para processos empíricos-mecanísticos, onde são analisadas as respostas do pavimento ao carregamento baseado nas espessuras e nos materiais utilizados. Para a camada de revestimento, o Módulo de Resiliência (MR) é um dos principais parâmetros para a avaliação do comportamento de tensão e deformação.

O MR foi introduzido por Francis Hveem em 1955, como forma de melhor representar o módulo de Young para materiais sob carregamentos cíclicos. A motivação para isto foram às discrepâncias entre a ordem de grandeza de deslocamentos dos materiais utilizados em pavimentação em relação aos materiais elásticos comumente utilizados na engenharia (Brito, 2006). Até hoje, este é um dos parâmetros mais utilizados para o estudo de materiais asfálticos.

O parâmetro rigidez tornou-se essencial para o dimensionamento de pavimentos, após o desenvolvimento dos métodos mecanísticos, que compatibilizam a solicitação do tráfego com dados de resistência dos materiais (Franco, 2007). Pode-se citar os métodos de Kerkhoven e Dormon (1953), Saal e Pell (1960) e Dormon e Metcalf (1965), métodos nacionais como por exemplo o Método da Resiliência (Motta, 1991) e o SisPav (Franco, 2007), além de métodos de dimensionamento que utilizam o módulo dinâmico como parâmetro de rigidez, como por exemplo o *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* ambos da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) (Bernucci *et al.*, 2007; Araújo *et al.*, 2009).

A utilização do MR como parâmetro de rigidez assume que misturas asfálticas se comportam como materiais elásticos. Porém, os materiais asfálticos apresentam

comportamento viscoelástico, ou seja, seu módulo varia em função da frequência de carregamento e da temperatura. Estuda-se, desde a década de 1960, a substituição do MR pelo Módulo Dinâmico (MD) (Araújo *et al.*, 2009). O MD, que por ser realizado a diferentes temperaturas e frequências, contabiliza esses efeitos na obtenção do parâmetro rigidez dos materiais asfálticos permitindo uma caracterização mais adequada, além de permitir a construção de curvas mestras (Soares e Souza, 2002).

A análise dos resultados do ensaio de MR não permite uma modelagem apropriada dos fenômenos comumente associados aos pavimentos, por não considerar o seu comportamento viscoelástico. Porém, este ainda é o parâmetro de rigidez mais difundido no país, devido tanto à cultura de utilização desse parâmetro quanto do alto valor de aquisição de equipamentos para obtenção de MD. Pode-se frisar, no entanto, que, para a realidade brasileira, o ensaio de MR é, de certa forma, sofisticado, visto que a normativa de dimensionamento em vigor no país ainda baseia-se em resultados do ensaio de CBR (*California Bearing Ratio*) e de número *N*.

Em uma análise prévia de normas nacionais e internacionais (BSi DD 213, 1993; DNER ME 133, 1994; AS 2891.13.1, 1995; ASTM D4123, 1995; AASHTO TP-31, 1996; prEN 12967-26, 2003; DNIT ME 135, 2010; ABNT NBR 16018, 2011) verificou-se que, há grande variação nos valores indicados para diversos parâmetros, tais como: tipo de carregamento, frequência de carregamento, número de ciclos na fase de pré-condicionamento, número de ciclos na fase de condicionamento, temperatura de ensaio, coeficiente de Poisson (determinado ou assumido) e metodologia de cálculo para o MR total e o MR instantâneo.

Variações nos parâmetros de ensaio podem levar à inconsistência de resultados caso utilizem-se metodologias distintas, pois os resultados de MR mostram alta sensibilidade às metodologias de cálculo, à frequência de ensaio, à temperatura e ao pulso de carga, sendo a magnitude desta influência função das propriedades das misturas ensaiadas (Brito, 2006). Verifica-se também que algumas normas não são suficientemente específicas em relação a alguns desses parâmetros, podendo levar a problemas relacionados à repetibilidade, mesmo em casos onde o mesmo procedimento é utilizado.

Essas divergências nos resultados podem levar a resultados que acarretem diferenças na análise (tensões e deformações) e no dimensionamento de estruturas. Tais diferenças podem afetar aspectos como: custo, vida útil e segurança dos pavimentos.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

Os métodos empírico-mecanísticos de dimensionamento de pavimentos, principalmente da camada de revestimento, estão intrinsecamente ligados ao parâmetro rigidez de misturas asfálticas, sendo o MR o mais utilizado. Estes métodos analisam, de forma mais apropriada, o comportamento da estrutura do pavimento, verificando as respostas dos materiais (tensão e deformação) em relação à solicitação do tráfego e levando em consideração as complexidades do material asfáltico. A previsão do comportamento desse material é complexa, pois seu módulo varia com a frequência de carregamento e a temperatura, devido a sua natureza viscoelástica.

Existem diversas metodologias para a obtenção do MR de misturas asfálticas, que divergem nas recomendações para diversos parâmetros de ensaio, além de que, foi publicada recentemente uma nova norma para obtenção do MR no Brasil, desenvolvida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Essa nova norma, NBR 16018 (2011), é mais afinada com as normativas internacionais para o ensaio de MR, por exemplo, em aspectos como: a obtenção do coeficiente de Poisson, a possibilidade de se obter o MR em diversas temperaturas, a descrição no texto da norma da metodologia de obtenção dos deslocamentos e a determinação do MR para diferentes metodologias de montagem de LVDTs, entre outras. A magnitude da diferença entre os resultados de MR obtidos através de metodologias distintas pode influenciar o dimensionamento de pavimentos asfálticos, sendo esta diferença o problema a ser investigado nesta monografia.

1.2. QUESTÕES DE PESQUISA

Para um maior entendimento do problema de pesquisa podem ser formuladas algumas questões, que auxiliem o entendimento do problema em si, como também, forneçam outras informações relacionadas, aumentando o entendimento do assunto. As questões são:

- Como as metodologias utilizadas para a determinação do MR de misturas asfálticas em laboratório podem influenciar nos resultados encontrados?
- Qual a influência do tipo de carregamento utilizado (pneumático ou hidráulico) nos resultados dos ensaios de MR a partir do uso dos mesmos materiais e das mesmas metodologias de ensaio?
- Qual o impacto da utilização de diferentes materiais (agregados e ligante) nos resultados de MR?
- Qual o impacto da diferença dos resultados de MR na análise e no dimensionamento de pavimentos asfálticos?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo geral

O objetivo geral dessa pesquisa é avaliar o impacto da utilização de diferentes metodologias para obtenção em laboratório do MR para misturas asfálticas.

1.3.2. Objetivos específicos

- Avaliar a influência do uso de diferentes metodologias de ensaio nos resultados do ensaio de MR para diferentes misturas asfálticas;
- Avaliar a influência do tipo de carregamento nos resultados do ensaio de MR conduzidos em laboratório para misturas asfálticas;

- Analisar os resultados obtidos do ensaio de MR de misturas asfálticas contendo materiais e curvas granulométricas distintas;
- Verificar o impacto dos resultados de MR obtidos através das diferentes metodologias avaliadas na análise e no dimensionamento de pavimentos asfálticos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

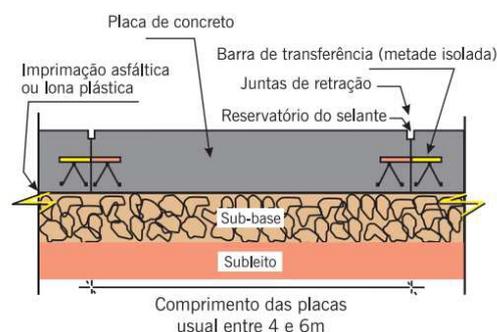
2.1. PAVIMENTO

Pavimentos são estruturas projetadas com a função de fornecer com qualidade condições de conforto e de segurança para os usuários das vias, suportando o impacto gerado principalmente pelo tráfego de veículos e pela variação de temperatura. A estrutura do pavimento é composta por múltiplas camadas assentadas sobre o subleito. São utilizados, em geral, materiais granulares nas camadas inferiores e sobre estas, uma camada de revestimento.

O revestimento é a camada superior, cuja função é resistir às ações do tráfego diretamente, além de transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, sendo também responsável pela impermeabilização do pavimento e pela melhoria das condições de rolamento. Para o revestimento são utilizados usualmente misturas asfálticas (pavimentos flexíveis) ou concreto de cimento Portland (pavimentos rígidos).

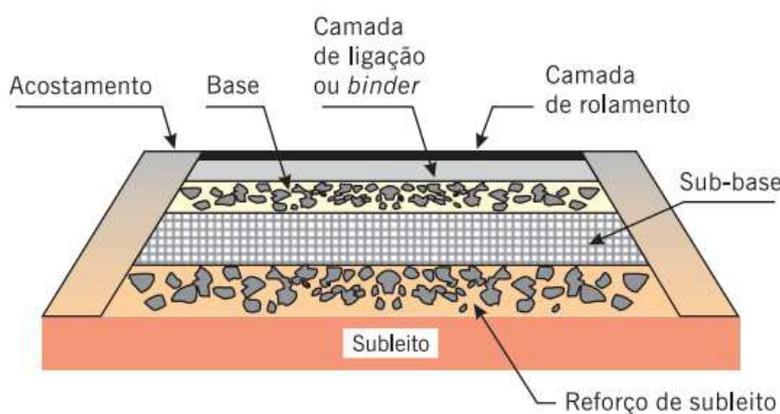
Em pavimentos rígidos, utiliza-se uma placa de concreto de cimento Portland como camada de revestimento, podendo esta ser armada com barras de aço ou não. As espessuras são definidas de acordo com a resistência à flexão da placa de concreto, como também, de acordo com a resistência das camadas granulares. Como camadas granulares utiliza-se usualmente base, subbase e reforço do subleito. A Figura 1 traz uma representação do corte de um pavimento rígido.

Figura 1: Pavimento rígido - Corte (Bernucci *et al.*, 2007)



As misturas asfálticas, que compõem o revestimento de pavimentos flexíveis, são basicamente constituídas de agregados e de ligante asfáltico. O revestimento asfáltico pode funcionar como a camada de rolamento em si, ou seja, ficar em contato direto com as rodas dos veículos, como também, como camada intermediária ou de ligação (*binder*). Utilizam-se, usualmente, como camadas granulares, base e subbase, além de eventualmente, uma camada de reforço do subleito. Segue, na Figura 2, a representação do corte de uma estrutura usual de pavimento flexível.

Figura 2: Pavimento flexível - Corte (Bernucci *et al.*, 2007)

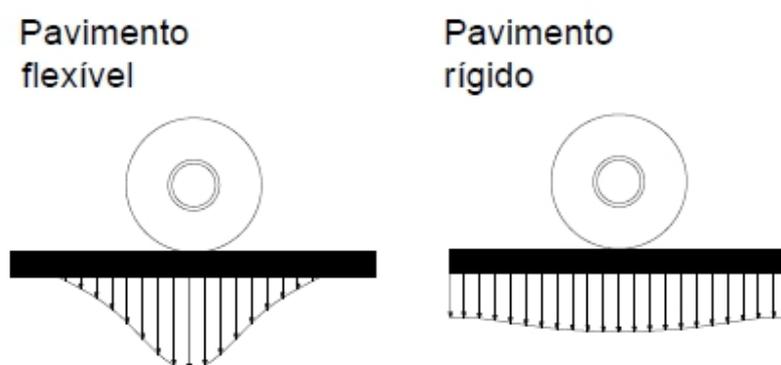


Os revestimentos das estruturas de pavimentos são, geralmente, em consequência dos carregamentos aplicados, submetidos a esforços de compressão e de tração devidos à flexão, ficando as demais camadas submetidas principalmente à compressão. Caso a camada granular, abaixo da camada de revestimento, seja composta por materiais estabilizados quimicamente (solo-cimento, por exemplo), que proporcionam coesão e aumentam a rigidez, esta pode resistir a esforços, também, de tração.

Em pavimentos de concreto de cimento Portland, devido à alta rigidez do material utilizado na camada de revestimento, as cargas de superfície são distribuídas em uma grande área, não limitando-se à área de contato entre o pneu e o pavimento. Essa característica permite que se utilizem camadas granulares subjacentes de menor resistência ou espessura, pois as tensões transmitidas a essas camadas são menores.

Nos pavimentos asfálticos, a rigidez do material utilizado no revestimento não é tão elevada em relação à rigidez das camadas granulares, fazendo com que as tensões atinjam as diversas camadas. Como as misturas asfálticas são mais flexíveis, as tensões não são tão bem distribuídas como acontece em pavimentos rígidos, se aproximando mais da área da superfície de contato pneu-pavimento. A Figura 3 ilustra a representação das áreas de distribuição de carga tanto nos pavimentos flexíveis quanto nos rígidos.

Figura 3: Área de distribuição de cargas – Pavimentos flexíveis e rígidos



2.2. DEFORMABILIDADE DE PAVIMENTOS

Os primeiros estudos acerca da deformabilidade dos materiais utilizados em pavimentação foram realizados por Francis Hveem na década de 1930, nos Estados Unidos. Hveem (1955) introduziu o conceito de resiliência, em detrimento ao termo deformação elástica, pois nesse estudo, argumentou-se que as deformações nos pavimentos são muito maiores do que nos materiais utilizados usualmente em obras de engenharia (concreto e aço por exemplo), que são em geral sólidos elásticos (Medina e Motta, 2005).

O termo resiliência representa a energia armazenada num corpo deformado elasticamente que é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações. Pode-se definir resiliência como a energia potencial de deformação (Medina, 1997).

O conceito de MR, porém, segundo Brito (2006), foi introduzido por Seed *et al.* (1962). Este corresponde basicamente ao módulo de elasticidade obtido em condições de carregamento cíclico, como são usualmente submetidos os materiais de pavimentação durante sua vida de serviço.

Para a obtenção desse parâmetro de rigidez, utilizam-se usualmente ensaios de compressão diametral, desenvolvidos no Brasil pelo professor Lobo Carneiro em 1943 para a determinação indireta da resistência à tração de materiais como concreto de cimento Portland (Bernucci *et al.*, 2007). A aplicação do MR para pavimentos asfálticos foi introduzida apenas em 1972, por Schmidt (Brito, 2006).

O MR, porém, não é a única forma de se obter parâmetros quanto à deformabilidade de pavimentos. Existem diversos ensaios que utilizam amostras com diferentes geometrias, tendo cada um destes, vantagens e desvantagens em relação a quesitos tais como: facilidade da obtenção dos corpos de prova, custos dos equipamentos para a realização do ensaio, confiabilidade e repetibilidade dos resultados, entre outros. Segue na Figura 4, adaptada por Brito (2006) dos trabalhos de Capitão (2003) e Di Benedetto (2004), os princípios de cada ensaio.

As cargas do tráfego, transmitidas ao pavimento, são diversas e geram, normalmente, tensões de:

- Compressão triaxial na superfície e imediatamente abaixo do pneu;
- Tração longitudinal combinada com compressão vertical na base da camada de concreto asfáltico e imediatamente abaixo da carga;
- Tração longitudinal ou transversal na superfície distante do ponto de aplicação da carga;
- Compressão longitudinal ou transversal na base da camada de concreto asfáltico a alguma distância da carga.

As tensões citadas acima estão representadas na Figura 5, que ilustra o estado de tensões típico que ocorre no pavimento devido ao carregamento de uma roda.

Figura 4: Ensaios para análise de deformabilidade em misturas asfálticas (Brito, 2006)

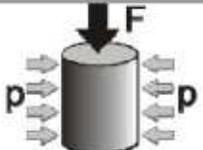
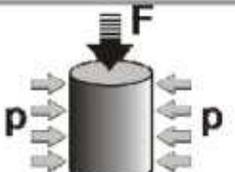
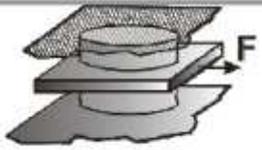
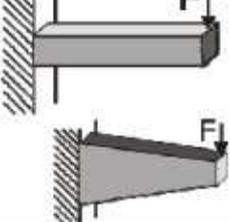
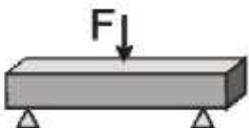
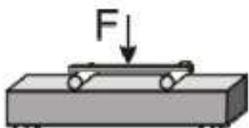
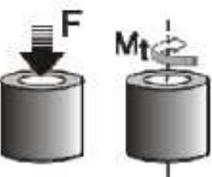
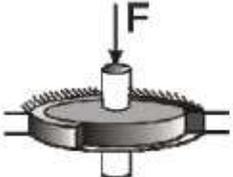
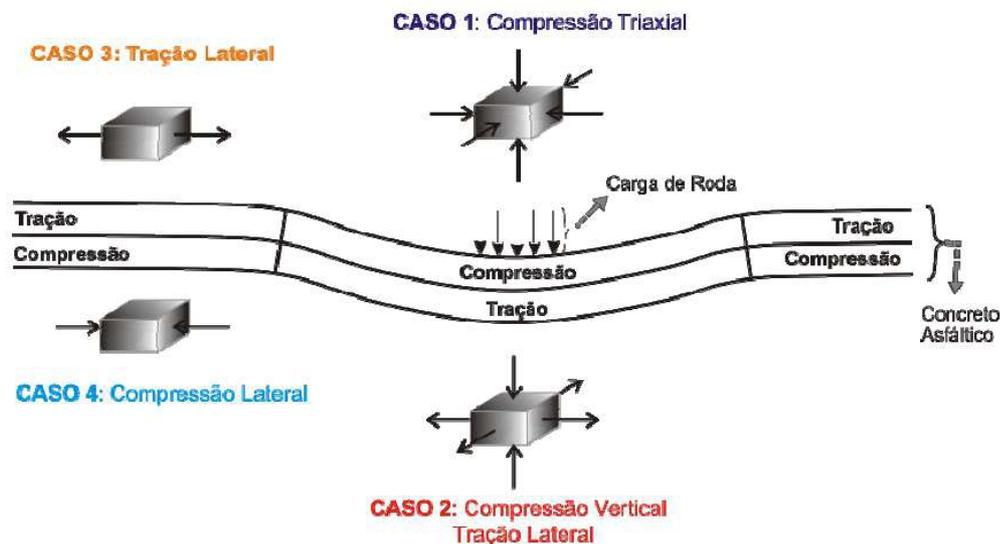
		
<p>(a) Ensaio de Compressão Uniaxial Estática</p>	<p>(b) Ensaio de Compressão Uniaxial com Aplicação de Cargas Repetidas</p>	<p>(c) Ensaio de Tração Direta</p>
		
<p>(d) Tração Indireta Estática</p>	<p>(e) Tração Indireta com Aplicação de Cargas Repetidas</p>	<p>(f) Compressão Triaxial Estática</p>
		
<p>(g) Compressão Triaxial com aplicação de Cargas Repetidas</p>	<p>(h) Ensaio de Cisão LCPC (<i>Essai de Scission LCPC</i>)</p>	<p>(i) Ensaio de Corte Simples (com ou sem aplicação de cargas repetidas)</p>
		
<p>(m) Flexão em 2 pontos</p>	<p>(n) Flexão em 3 pontos</p>	<p>(o) Flexão em 4 pontos</p>
		
<p>(j) Compressão axial e corte c/ aplicação de cargas repetidas em cilindros ocos. (<i>Hollow Cylinder</i>)</p>	<p>(k) Ensaio de Corte Co-axial</p>	<p>(l) Ensaio de Corte Simples a altura constante (com ou sem aplicação de cargas repetidas)</p>

Figura 5: Estados de tensões típicos em uma camada de concreto asfáltico submetido à uma carga de roda – Adaptado de Roque e Buttlar (1992) *apud* Brito (2006)



2.3. MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)

Devido a sua simplicidade e baixo custo, o ensaio para obtenção do MR através do carregamento por tração indireta tem sido bastante utilizado e estudado. O princípio utilizado neste ensaio é o de que, quando se aplica um carregamento de compressão em um corpo de prova (CP) cilíndrico, geram-se tensões de tração relativamente uniformes perpendicularmente ao diâmetro solicitado. Este efeito é conhecido como estado biaxial de tensões.

A solução teórica para o comportamento das tensões no interior de um disco comprimido por duas cargas diametralmente opostas foi primeiramente discutida em 1883 por Hertz. Foram obtidos resultados semelhantes posteriormente, por Michell em 1900, Timoshenko em 1934 e por Wright em 1955 (Brito, 2006).

Um dos principais fatores para a ampla utilização do ensaio de tração indireta é a facilidade de obtenção de corpos de prova tanto nos Compactadores Giratórios Superpave (CGS), quanto nos compactadores utilizados na metodologia Marshall. Pode-se também, a

partir do uso dessa metodologia, utilizar corpos de prova extraídos de pavimentos, usualmente delgados. Além disto, as condições superficiais dos corpos de prova, que poderiam ser um problema em amostras extraídas, não afetam significativamente os resultados.

A definição do MR é similar à do módulo de elasticidade, também conhecido como módulo de Young, da mecânica clássica, onde ambos são representados pela razão entre a tensão e a deformação. De acordo com a teoria da elasticidade, tanto o MR quanto o módulo de Young possuem o mesmo conceito.

Soares e Souza (2002) apontam que a consideração do comportamento viscoelástico para misturas asfálticas permite uma caracterização mais adequada desses materiais. Logo, a utilização do MR para a previsão do comportamento de pavimentos asfálticos não é tão acurada, por este não considerar o comportamento viscoelástico dos materiais, ou seja, não levar em consideração a resposta do material para diferentes frequências e tempos de aplicação de carga.

Outra implicação em não considerar a resposta do material à diferentes frequências foi apontada por Monismith (1989). Este autor afirma que a taxa entre o período de carregamento e o período de descanso afetam diretamente as deformações recuperáveis que ocorrem, e conseqüentemente, o valor do MR. Quanto menor for o período de descanso, menor deve ser a deformação recuperável medida, acarretando assim em maiores valores de MR.

A utilização do MR, por não considerar o comportamento viscoelástico dos materiais, impossibilita uma melhor modelagem dos fenômenos comumente associados aos pavimentos. Porém, segundo Huang (1993), misturas asfálticas podem ser consideradas elásticas quando são aplicados carregamentos pequenos (valores de tensão inferiores à resistência a tração (RT) do material) e o carregamento for repetido por ciclos suficientemente longos. Estes materiais podem ser caracterizados como materiais elásticos, utilizando o módulo de Young e o coeficiente de Poisson (Love, 1944).

Quando um material é comprimido em uma dada direção, este usualmente tende a se alongar nas direções perpendiculares à aplicação do carregamento. Este efeito é conhecido como efeito de Poisson. O coeficiente de Poisson consiste na razão entre as

deformações transversal e longitudinal do material. Para materiais asfálticos, considera-se que o coeficiente de Poisson varia apenas com a temperatura, ou seja, é independente do tipo de carregamento utilizado. Para misturas asfálticas, são comumente encontrados valores na ordem de grandeza de 0,35 para baixas temperaturas e de 0,5 para altas temperaturas (Von Quintus *et al.*, 1991). No Brasil, geralmente adota-se o valor de 0,30 como coeficiente de Poisson para misturas asfálticas.

Theisen (2010) aponta que não há um consenso sobre os valores utilizados para o coeficiente de Poisson. Valores comumente utilizados, como os da norma ASTM D4123 (1995) para a execução do ensaio de compressão diametral, que sugere valores de coeficiente de Poisson de 0,30 para 5°C, 0,35 para 25°C e 0,40 para 40°C, não são compatíveis com os encontrados na literatura, pois estes são muito mais sensíveis à temperatura do que se acreditava. Além disso, o citado autor conclui que para materiais viscoelásticos, o coeficiente de Poisson é dependente do nível de tensão e do tempo de carregamento, tornando impossível a obtenção um coeficiente de Poisson constante para materiais viscoelásticos.

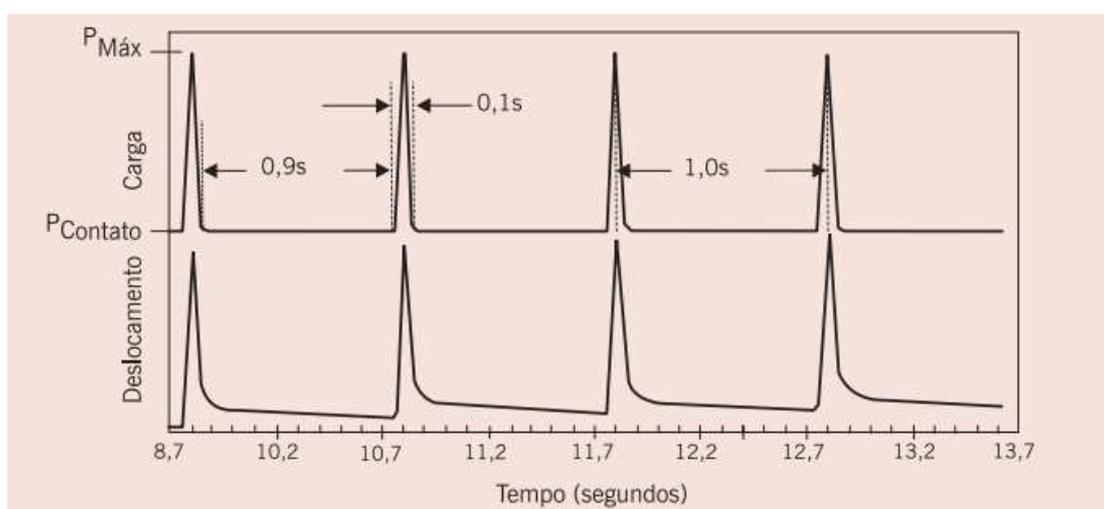
Apesar de sua fragilidade teórica, o ensaio de MR ainda é o mais difundido no país, tanto devido à cultura de utilização desse parâmetro, quanto devido ao valor elevado dos equipamentos para obtenção do Módulo Dinâmico (MD). Este último é um parâmetro de rigidez distinto que é realizado a diferentes frequências de carregamento e a diferentes temperaturas.

O ensaio de MR para materiais asfálticos, normatizado no Brasil através da norma DNIT ME 135 (2010), é usualmente realizado através da aplicação de um carregamento cíclico, no plano diametral de um CP cilíndrico com dimensões aproximadas de 100mm de diâmetro e 63,5mm de altura. Esse carregamento gera um estado biaxial de tensões, sendo possível a medição dos deslocamentos gerados pelas tensões de tração através do uso de LVDTs (*Linear Variable Displacement Transducers*).

Cada ciclo de aplicação de carga tem a duração de um segundo, sendo 0,1 segundo de carregamento e 0,9 segundo de repouso, tentando simular a passagem de pneus no pavimento. Souza e Soares (2003) verificaram que o tempo de carregamento de 0,1s é razoável. Estes autores mostraram que a resposta estrutural de um pavimento asfáltico,

quando utilizado um modelo elástico e o MR igual ao módulo de Young, tem resultados semelhantes à aplicação de um modelo viscoelástico com a utilização deste mesmo tempo de carregamento. Segue abaixo, na Figura 6, a representação gráfica dos períodos de carregamento e de repouso durante a execução do ensaio de MR, onde P_{Contato} representa a carga aplicada para manter os frisos em contato com o CP e $P_{\text{Máx}}$ representa a carga máxima aplicada no CP.

Figura 6: Ciclo de aplicação de cargas, período de descanso e curva de deslocamento durante o ensaio de MR (Bernucci *et al.*, 2007)

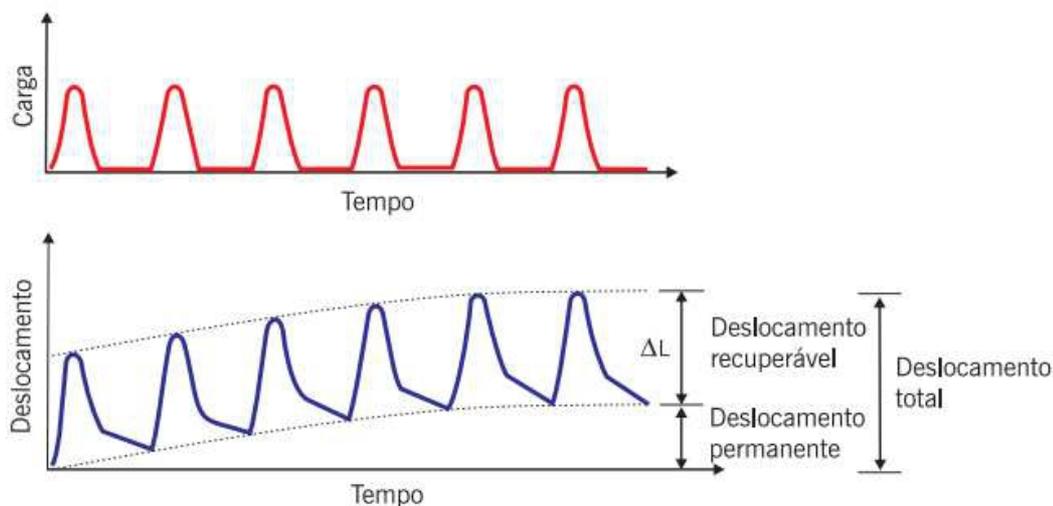


Pode-se notar, através da Figura 7, que a curva de deslocamento obtida durante o ensaio de MR, divide-se em deslocamento recuperável e permanente. Estes dois tipos de deslocamentos combinados representam o deslocamento total.

No ensaio de MR, mesmo que se utilize baixos níveis de carregamento (abaixo de 5% do valor da RT do material) durante a realização dos ensaios, ainda são perceptíveis deslocamentos não-recuperáveis (deslocamentos plásticos), que não devem ser contabilizados no cálculo do MR. Nas metodologias de cálculo do MR, contorna-se essa condição através de correção dos deslocamentos utilizados para a obtenção deste parâmetro. Os deslocamentos obtidos após o processamento dos dados são denominados: instantâneo (do processamento da curva de deslocamento) e total (da diferença entre a posição inicial e o pico da curva de deslocamento). O método adotado para a obtenção dos

deslocamentos utilizados para o cálculo do MR será apresentando no Capítulo 3 desta monografia.

Figura 7: Parcela recuperável e permanente da curva de deslocamento para o ensaio de MR (Bernucci *et al.*, 2007)



Os deslocamentos instantâneo e total são utilizados para o cálculo do MR instantâneo e do MR total. Quanto mais próximos forem estes dois módulos, mais rápida é a recuperação elástica do material quando submetido à ação de cargas (Brito, 2006). No caso de vias de elevado volume de tráfego, é importante que estes dois valores sejam o mais próximo possível, podendo-se modificar o arranjo dos agregados ou a escolha do ligante para atender a este requisito (Bernucci *et al.*, 2007).

Segundo Soares e Souza (2003), para materiais viscoelásticos, o MR varia tanto com o tempo de aplicação de carga como com o tempo de repouso, uma vez que a deformação recuperável depende destes valores. No entanto, para materiais viscoelásticos lineares, embora a deformação total varie com o número de ciclos de aplicação de carga, em função do acúmulo de deformações não-recuperáveis, a deformação recuperável deve se manter constante ao longo destes ciclos.

Os resultados obtidos através da realização do ensaio de MR podem ser afetados com a variação de diversos parâmetros. Brito (2006) observou a dependência do MR com relação ao pulso de carga (variação média de 25%), à frequência de ensaio (variação média

de 30%) e ao nível de tensão (variação média entre 10% e 20%) aplicado durante o ensaio, sendo a magnitude da variação em função do tipo de mistura asfáltica ensaiada. O autor também verificou que os valores encontrados para o coeficiente de Poisson (ν) são sensíveis ao método utilizado para a obtenção do mesmo, como os propostos nas pesquisas NCHRP 1-28 (Barksdale *et al.*, 1997) e NCHRP 1-28A (Witzack, 2004) e do Protocolo P07 do *Federal Highway Administration* (FHWA, 2001), apresentando um desvio padrão de até 0,13 para as amostras ensaiadas.

A geometria dos frisos utilizados para aplicação da carga também pode afetar os resultados de ensaios conduzidos sob compressão diametral. Falcão e Soares (2002) desenvolveram um estudo onde os mesmos analisaram os resultados de ensaios realizados com a utilização de frisos confeccionados com diferentes larguras, em misturas asfálticas. Estes autores verificaram a variação do valor de RT em função de diferentes frisos testados e a importância da consideração da resposta viscosa do material na determinação dos parâmetros de resistência. No mesmo trabalho, os citados autores também observaram que os pontos da amostra submetidos a tensões de tração horizontais ao longo do diâmetro vertical também estão submetidos a tensões de compressão, podendo a carga máxima de ruptura, atribuída inicialmente apenas às tensões de tração, ser afetada por este efeito.

Moura e Bernucci (2004) observaram que, tanto nos ensaios de RT por compressão diametral quanto nos ensaios de MR, existe uma relação não-linear entre os deslocamentos verticais e horizontais. Isso evidencia a necessidade da obtenção do coeficiente de Poisson durante os ensaios de MR, que, para efeito de cálculo deste parâmetro é usualmente assumido. Tal medida reduz a possibilidade de erro na determinação deste parâmetro de rigidez em função da variação do coeficiente de Poisson com a carga aplicada.

2.4. MÓDULO DINÂMICO (MD)

Para sanar as deficiências oriundas do uso do MR como parâmetro de rigidez para misturas asfálticas, vem sendo pesquisadas, desde a década de 60, alternativas para a caracterização da rigidez de misturas asfálticas. Papazian (1962), um dos primeiros pesquisadores a observar o comportamento viscoelástico linear em misturas asfálticas, realizou ensaios onde aplicavam-se tensões senoidais a corpos de prova, à temperatura

controlada e com várias frequências, medindo-se as deformações resultantes, concluindo que os conceitos de viscoelasticidade linear poderiam ser aplicados no estudo dos materiais asfálticos. Esse ensaio, proposto inicialmente em 1962 por Papazian, hoje é conhecido como ensaio de MD (Bernucci *et al.*, 2007; Theisen, 2011).

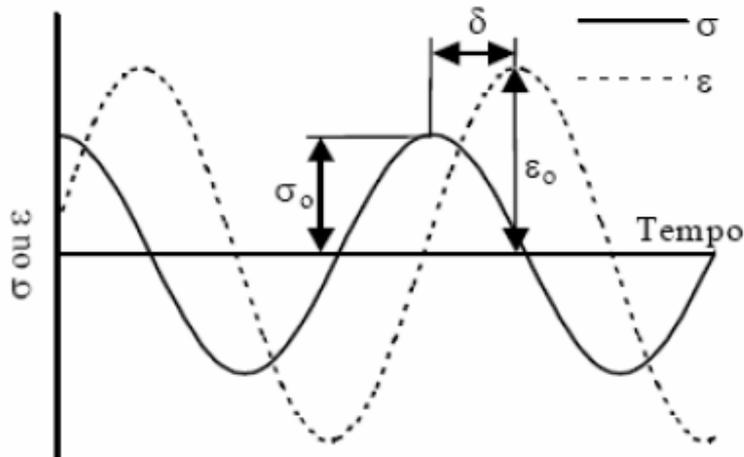
Atualmente, devido à possibilidade de se considerar o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas, como também de se contabilizar os efeitos de diferentes temperaturas e frequências de carregamento, o MD vem sendo amplamente utilizado internacionalmente. Os resultados dos ensaios de MD podem ser usados para determinar tanto as características elásticas quanto as propriedades viscoelásticas lineares do material (Christensen, 1982).

O ensaio de MD é realizado através da aplicação de um carregamento de compressão axial semi-senoidal (*haversine*) em CPs cilíndricos, sendo medidos os deslocamentos verticais correspondentes à aplicação da carga com o auxílio de LVDTs. Deste ensaio obtêm-se as propriedades viscoelásticas das misturas como o módulo dinâmico ($|E^*|$) e o ângulo de fase (δ) para várias combinações de frequências e de temperaturas.

Não existe normatização para o ensaio de MD no Brasil, no entanto, utilizam-se usualmente as normas AASHTO TP 62-03(2005) e ASTM 3497-79 (2003), ambas americanas. O ensaio normalmente requer corpos de prova de 100mm de diâmetro e 150mm de altura e é realizado para diversas frequências (variando entre 0,1Hz e 25Hz) e temperaturas (entre -10°C e 54,4°C), possibilitando conhecer-se as características do material nas diversas condições as quais este é submetido.

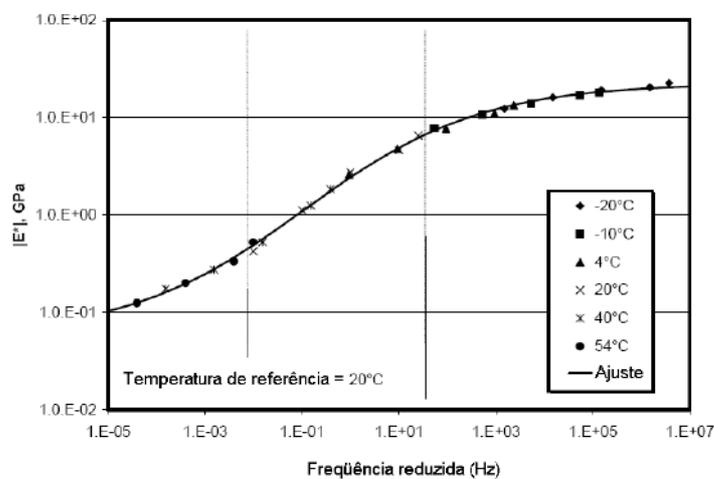
O MD, que corresponde a razão entre o pico de tensão e o pico de deformação do material, é o valor absoluto do módulo complexo. O ângulo de fase é função das propriedades viscosas do material, correspondendo à defasagem da resposta da deformação em relação à tensão. Para materiais elásticos, $\delta = 0^\circ$, a resposta é imediata, e para materiais puramente viscosos, o δ é considerado igual a 90° . Devido à natureza viscoelástica, as misturas asfálticas apresentam uma defasagem entre a tensão aplicada e a deformação medida, ou seja, o ângulo de fase é um valor intermediário entre 0° e 90° (Araújo *et al.*, 2009). A Figura 8 ilustra a defasagem da resposta da deformação (ϵ_o) em relação à tensão (σ_o) em materiais viscoelásticos.

Figura 8: Desenho esquemático do comportamento viscoelástico dos materiais (Medeiros, 2006)



Os dados obtidos a partir do ensaio de MD possibilitam a geração de curvas mestras. A curva mestra de uma mistura asfáltica permite que se conheça o comportamento do material para uma ampla faixa de frequências e de temperaturas, dando um maior conhecimento do comportamento deste. A construção da curva mestra utiliza o princípio da superposição tempo-temperatura (Ferry, 1980 *apud* Bernucci *et al.*, 2007). Este princípio permite que os dados coletados a diferentes temperaturas sejam deslocados horizontalmente a partir da utilização de uma temperatura de referência (Bernucci *et al.*, 2007). A Figura 9 traz a representação de uma curva mestra.

Figura 9: Curva mestra para o ensaio de módulo dinâmico (Theisen, 2011)



Para a superposição das curvas obtidas para diferentes temperaturas e frequências, e a consequente construção da curva mestra, utiliza-se um fator de mudança de temperatura, ou fator de deslocamento horizontal. Para a obtenção do fator de deslocamento, as equações mais utilizadas são as equações de Arrhenius e a de William-Landel-Ferry, também conhecida como equação WLF (Theisen, 2011). Como o ensaio de MR, em geral, não é realizado a diferentes frequências e temperaturas, não é possível a construção de curvas mestras, impossibilitando assim um maior conhecimento do comportamento do material.

O termo MD pode ser utilizado para designar qualquer tipo de módulo obtido de forma não estática. O ensaio pode ser realizado com diversas geometrias de corpos de prova, sendo os mais conhecidos aqueles que utilizam corpos de prova cilíndricos com razão entre altura e diâmetro de 2 para 1 (com diâmetro mínimo de 100mm), como representado na Figura 10, e os que utilizam vigas trapezoidais à flexão, método desenvolvido pelo IFSTTAR (*Institut Français des Sciences et Technologies des Transports*), na França, com o intuito de se realizar o ensaio utilizando corpos de prova em formato de paralelepípedo (Brito, 2006).

Figura 10: Esquema de ensaio de módulo dinâmico por compressão axial (Coutinho, 2009)



O procedimento descrito pela norma AASHTO TP62-03 (2003) para o ensaio de MD estabelece que o ensaio deve ser realizado a frequências que variam de 0,1Hz a 25Hz e em temperaturas dentro da faixa entre -10°C e 54,4°C. A norma ASTM 3497-79 (2003) estabelece apenas três temperaturas de ensaio (5°C, 25°C e 40°C) e três frequências de carregamento (1Hz, 4Hz e 16Hz).

As duas normatizações também diferem quanto à magnitude do carregamento. A norma ASTM 3497-79 (2003) recomenda valores de até 200kPa, independente da faixa de temperatura na qual o ensaio é realizado, enquanto a norma AASHTO TP62-03 (2003) recomenda que a magnitude do carregamento varie em função da rigidez do material, oscilando numa faixa entre 15kPa e 2800kPa. Essa recomendação se deve ao fato de que, devido ao comportamento viscoelástico do material, à baixas temperaturas as amostras estão mais rígidas, logo, carregamentos de maior magnitude são necessários.

Para a obtenção de resultados com maior representabilidade, recomenda-se a regularização das faces do CP, de forma que estas estejam paralelas para que não haja concentração de tensões. Para isso, serra-se as duas faces do CP. Para sanar o problema da variação do Volume de vazios (V_v) ao longo das seções transversais do CP, molda-se o mesmo com dimensões maiores à desejada e extrai-se deste, com o auxílio de sonda rotativa, o CP no qual será realizado o ensaio, como representado na Figura 11 (Bernucci *et al.*, 2007).

Figura 11: Corpo-de-prova com núcleo central extraído (Bernucci *et al.*, 2007)



2.5. RELAÇÃO ENTRE MÓDULO DE RESILIÊNCIA E MÓDULO DINÂMICO

Existem críticas na literatura quanto a não existência do período de repouso nos atuais procedimentos de ensaio para a determinação do MD. Não existiria necessidade do período de repouso em amostras puramente elásticas, porém, Christensen (1982) mostra que materiais viscoelásticos possuem memória de carregamento, fazendo com que este tipo de material sofra influência do período de repouso em sua curva de deformação.

Comparando-se as curvas de tensão e de deformação obtidas por Hu *et al.* (2008) (Figura 12) através de ensaios de MD e de MR, é possível observar que a amplitude de deformação das amostras ensaiadas é bem menor para o ensaio de MD, se comparada com aquela obtida durante o ensaio de MR. No mesmo trabalho, estes autores também comparam a magnitude das deformações obtidas a partir dos dois ensaios (Figura 13), mostrando que, apesar de possuírem picos de deformação bem próximos no primeiro ciclo de carregamento, a partir do segundo pico, a curva referente as deformações geradas durante o ensaio de MR apresenta valores até 20% maiores, fazendo com que se considere apenas a parcela elástica nesse tipo de ensaio, elevando-se assim os valores de rigidez encontrados.

Figura 12: Comparação entre as curvas de tensão e de deformação obtidas através de ensaios de (a) MD e (b) MR - Adaptado de Hu *et al.* (2008)

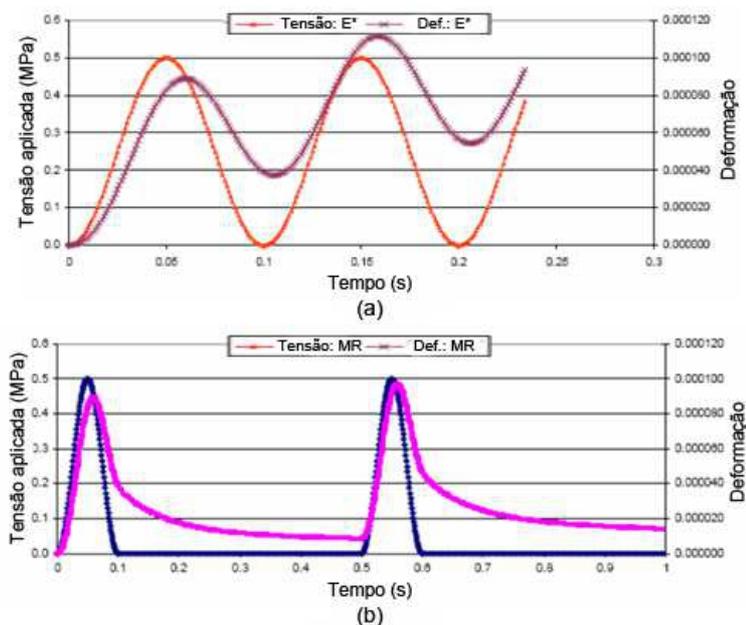
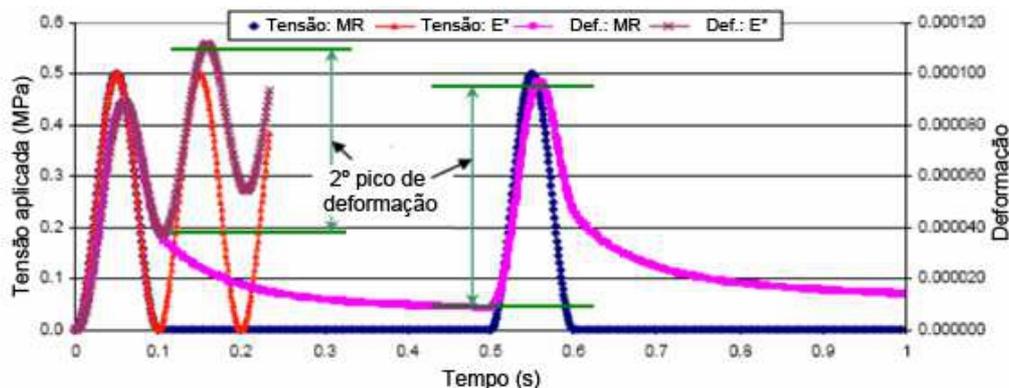


Figura 13: Comparação entre a magnitude das deformações obtidas durante os ensaios de MR e MD - Adaptado de Hu *et al.* (2008)



É necessário que o tempo de carregamento nos ensaios de MR e de MD sejam equivalentes para que se realizem comparações entre os valores obtidos. Como as metodologias para execução dos dois ensaios divergem na questão do tempo de repouso, e no caso do MD, com relação às frequências utilizadas, faz-se necessária a conversão do domínio do tempo para o domínio da frequência. Essas metodologias são abordadas na literatura desde 1982 por Christensen, sendo realizados estudos posteriores por Daniel e Kim em 1998, Loulizi *et al.* em 2006, Dongre *et al.* em 2006 e Hu *et al.* em 2008 (Araújo *et al.*, 2009).

Araújo *et al.* (2009) fizeram considerações sobre o MD e o MR. Neste trabalho, estes autores verificaram a influência do período de repouso e mostraram diversas formas de conversão entre os domínios do tempo e da frequência na realização de comparações entre os valores obtidos através das duas metodologias. Neste citado trabalho foi concluído ainda que o tempo de repouso não possui grande influência nos resultados de MR e MD para temperaturas de até 25°C, visto que, após a conversão do domínio do tempo para o domínio da frequência, os resultados obtidos foram próximos (razão entre MD e MR aproximadamente 1), porém, para temperaturas elevadas (acima de 40°C) este efeito é significativo, com valores de MD 50% maiores se comparados aos valores de MR.

LaCroix *et al.* (2007) apresentaram um método analítico para obtenção do MR através de valores de MD, utilizando a aplicação da teoria da viscoelasticidade linear para soluções lineares conhecidas. Foram obtidos resultados precisos para todas as temperaturas avaliadas, além de que, a precisão dos resultados não foi afetada quando foram utilizados

diferentes valores de coeficientes de Poisson em função da temperatura (foram utilizados valores de coeficiente de Poisson de 0,15, 0,2 e 0,25 para 5°C, 0,25, 0,3 e 0,35 para 25°C e 0,4, 0,45 e 0,5 para 40°C). Apesar da tendência apontar para o uso do MD em detrimento do MR, a predição do MR através de valores de MD é importante para comparação dos resultados de MD com o vasto banco de dados de MR existente.

Também existem métodos para a previsão do MD a partir de valores de MR. Essa transformação é interessante, pois possibilita que haja uma maior disseminação do MD, cujos equipamentos para obtenção são de alto valor aquisitivo, enquanto os equipamentos para a realização do ensaio de MR já são mais difundidos.

LaCroix *et al.* (2008) desenvolveram uma rede neural para a obtenção do MD a partir do MR e do fator de deslocamento horizontal do ligante. Os resultados obtidos tanto fornecidos pela rede neural, quanto obtidos em laboratório foram lançados no modelo de previsão de desempenho do MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*) do NCHRP 1-37A(2004) onde foram avaliados critérios como índice de irregularidade, deformação permanente e fratura no revestimento do topo a base. Os resultados obtidos da rede neural acarretaram em respostas no máximo 19% superiores para os dois primeiros critérios, enquanto com relação à fratura, a diferença foi de 39%. Outros métodos que podem ser citados são aqueles publicados por Barksdale *et al.* (1997) e por Witzack (2004), que utilizam a teoria da viscoelasticidade para a predição do MD a partir do MR.

O desenvolvimento dessas metodologias ganhou grande importância depois da publicação do guia para dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos do NCHRP (2004) (*Project 1-37A Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*). Nesse guia, o MD passou a ser o parâmetro utilizado para a caracterização de misturas asfálticas com relação a rigidez e um dos *input* para o dimensionamento de pavimentos asfálticos.

2.6. MÉTODOS PARA DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

O adequado dimensionamento de um pavimento asfáltico consiste em assegurar, dentro do seu período de projeto, que o carregamento aplicado na estrutura, devido à repetição da passagem dos eixos dos veículos não irá causar o trincamento excessivo da camada de revestimento por fadiga. Deve-se garantir também que as espessuras das camadas de revestimento e granulares, e a qualidade dos materiais utilizados nestas, sejam capazes de minimizar os efeitos do afundamento da trilha de roda (Franco, 2007).

Historicamente, têm-se utilizado métodos empíricos para o dimensionamento de pavimentos. Estes se baseiam em regras desenvolvidas a partir de observações e da experiência com pavimentos, materiais e condições específicas em locais de clima conhecidos. A maior limitação desses métodos é que estes não podem ser generalizados com confiabilidade para outras condições diferentes daquelas utilizadas para o seu desenvolvimento.

Uma das críticas aos métodos empíricos é a de que não há contabilização dos danos nas estruturas de pavimentos, que são ocasionados principalmente devido à aplicação de cargas elevadas e ao grande número de repetições da passagem das rodas dos veículos. A não consideração desses efeitos se dá pelo fato de que os métodos empíricos, em geral, foram desenvolvidos baseados na observação da deformação do subleito, não levando em consideração os efeitos da fadiga (Franco, 2007).

Com o desenvolvimento da computação, bem como das ferramentas de análise matemática, tornou-se possível o estudo do pavimento como um sistema de camadas cujos parâmetros de deformabilidade são conhecidos. Isso possibilitou o desenvolvimento de métodos de dimensionamento empíricos-mecanísticos, baseados nas cargas aplicadas e nas propriedades dos materiais, obtidos através de ensaios dinâmicos realizados nos solos que constituem as camadas granulares e na mistura asfáltica que constitui o revestimento, juntamente com a análise de tensões e de deformações, inclusive de caráter não-linear (Motta, 1991).

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis e semi-rígidos utilizado atualmente no Brasil, o método do DNIT, criado pelo engenheiro Murillo Lopes de Souza, baseado no método criado pelo Departamento de Estradas da Califórnia e adaptado por

engenheiros militares para construção de pavimentos de aeroportos durante a Segunda Guerra Mundial. Este método data da década de 60 e baseia-se em curvas de dimensionamento e na conversão do tráfego real em um número N . Este método considera apenas a rigidez das camadas granulares, através do CBR (*California Bearing Ratio* ou Índice de Suporte Califórnia). Além do método do DNIT não avaliar os parâmetros de rigidez das camadas do pavimento, este não leva em consideração as mudanças que ocorreram nos materiais utilizados e os parâmetros da dosagem das misturas asfálticas (Motta, 1991; Soares *et al.*, 2010).

Soares *et al.* (2010) fizeram um levantamento das metodologias de dimensionamento de pavimentos utilizadas em diversos países (Áustria, Bélgica, Brasil, Espanha, Estados Unidos, França, Itália, Portugal, Reino Unido, Suíça, entre outros). Estes autores observaram, nesse estudo, que a maioria dos países europeus e os Estados Unidos consideram a resposta estrutural em seus métodos de dimensionamento, sendo os resultados calibrados por ensaios de laboratório ou dados de campo através do monitoramento de pistas existentes ou da construção de pistas experimentais.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS UTILIZADOS

Neste trabalho foram utilizados dois CAPs: convencional e modificado. O CAP convencional foi fornecido pela Lubnor/Petrobras e classificado por penetração como 50/70 e de acordo com a classificação Superpave como PG 70-28 (Coutinho, 2012). O mesmo ligante foi modificado com a adição de 4% em massa de EVA, a partir do estudo desenvolvido por Alencar (2009). A modificação do CAP foi realizada com o auxílio de um misturador de baixo cisalhamento e hélice cisalhante da marca Fisatom®, nas seguintes condições: temperatura de $160\pm 5^{\circ}\text{C}$, rotação de 544rpm por um período de 2 horas.

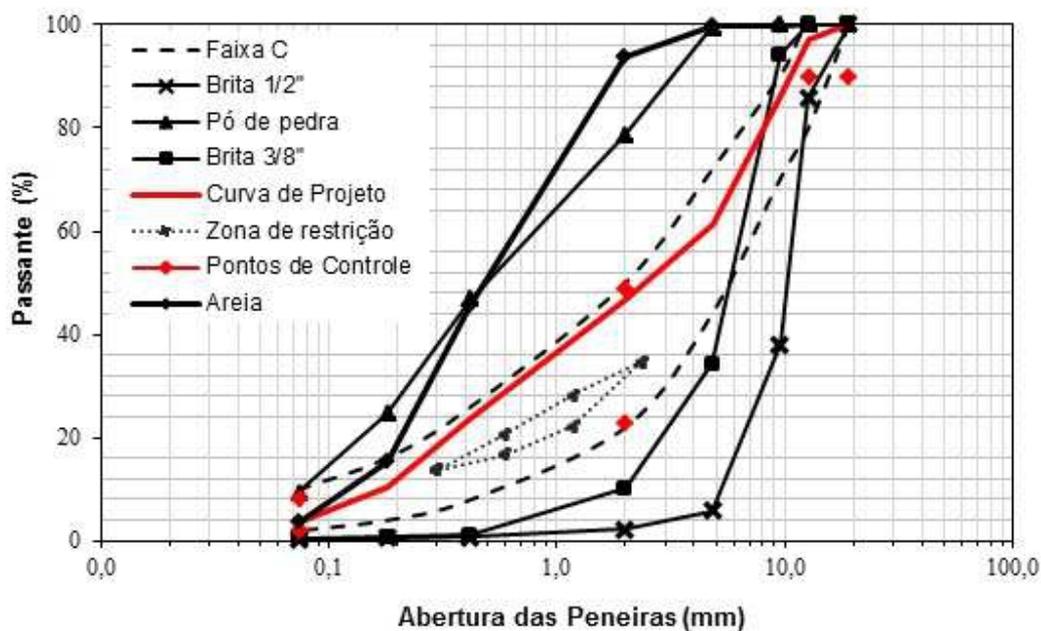
Os materiais granulares utilizados neste trabalho têm suas jazidas localizadas na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), especificamente nos municípios de Itaitinga, Eusébio, Caucaia e Maracanaú, e são comumente empregados em obras de pavimentação no Estado. Os materiais são de origem granítica, gnáissica e fonolítica (Bessa, 2012). A areia de campo utilizada, proveniente do sítio Maninho, foi cedida pela Insttale Engenharia Ltda.

Os agregados foram submetidos aos ensaios de caracterização por Coutinho (2012), segundo as normas: DNER-ME 083 (1998) (granulometria), DNER-ME 084(1995) (densidade real do agregado miúdo), DNER-ME 081(1998) (absorção e densidade de agregado graúdo), DNER-ME 086 (1994) (índice de forma), DNER-ME 078 (1994) (adesividade a ligante betuminoso) e DNER-ME 035 (1998) (abrasão *Los Angeles*). As propriedades estão mostradas na Tabela 1.

Neste trabalho foram avaliadas três misturas, com duas curvas granulométricas distintas, ambas incluídas na faixa C para CAs do DNIT (DNIT 031/2006-ES). Para a Mistura 1, utilizou-se como agregado graúdo as britas 1/2" e 3/8", provenientes da Pedreira 3, como material de enchimento utilizou-se pó de pedra (Pedreira 2) e a areia de campo, nas proporções de 20%, 30%, 25% e 25%, respectivamente. A curva granulométrica da Mistura 1 está representada na Figura 14.

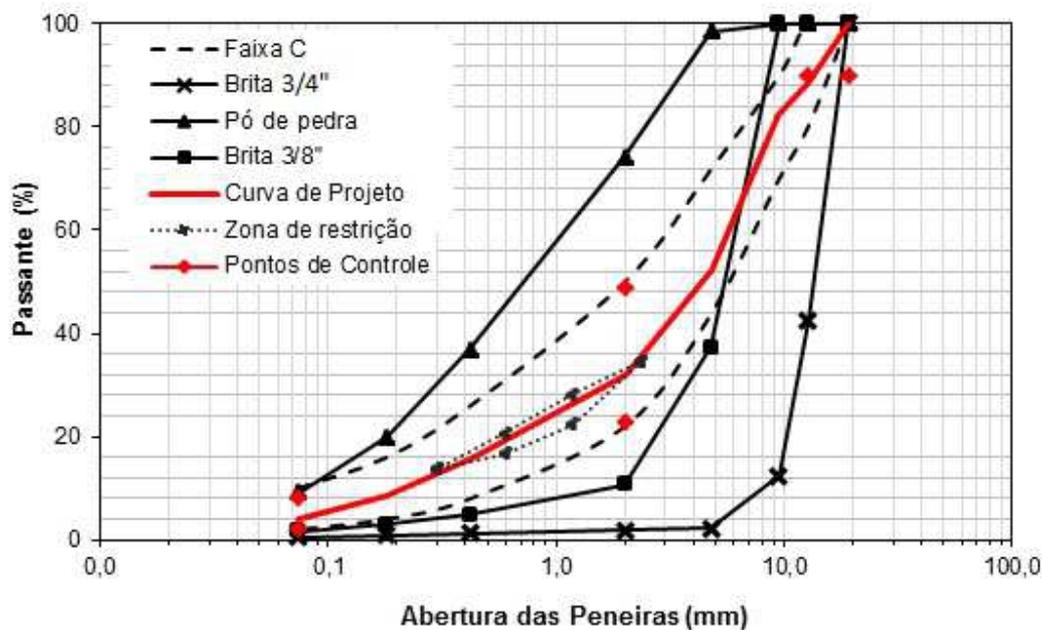
Tabela 1: Caracterização dos agregados – Adaptada de Coutinho (2012)

Propriedade	Pedreira 1		Pedreira 2		Pedreira 3		Sítio Maninho
	3/4"	3/8"	Pó de pedra	Pó de pedra	1/2"	3/8"	Areia de campo
Natureza mineralógica	Granítica		Gnáissica		Fonolítica		-
Abrasão Los Angeles	44	42	-	-	19	19	-
Absorção (%)	0,99	1,20	-	-	0,87	0,81	-
Adesividade	Insatisfatória		-	-	Insatisfatória		-
Densidade real	2,65	2,66	2,64	2,72	2,48	2,49	2,64
Densidade aparente	2,58	2,58	-	-	2,43	2,30	-
Densidade real - Fíler	-	-	2,61	-	-	-	-
Índice de forma	0,92	0,66	-	-	0,91	0,80	-

Figura 14: Curva granulométrica dos agregados e da Mistura 1 – Adaptado de (Coutinho, 2012)

Para as Mistura 2 e 3, foram utilizadas as britas 3/4" e 3/8", como agregado graúdo, e como agregado miúdo, pó de pedra, com proporções de 20%, 44% e 36%, respectivamente. A curva granulométrica utilizada para essas misturas está na Figura 15.

Figura 15: Curva granulométrica dos agregados e das Mistura 2 e 3 – Adaptado de (Coutinho, 2012)



3.2. DOSAGEM E REPLICAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

As dosagens das misturas do tipo CA utilizadas neste trabalho, foram feitas seguindo a metodologia Superpave. Nesta metodologia, estima-se um teor provável de projeto de CAP através da fixação do Vv, no caso deste trabalho, 4%, e do conhecimento da granulometria dos agregados disponíveis (Bernucci *et al.*, 2007).

As amostras de 100mm de diâmetro foram obtidas através de amassamento com um CGS Servopac® da IPC Global. As curvas granulométricas utilizadas não obedecem aos critérios de zona de restrição e pontos de controle, pois optou-se pelo uso de curvas granulométricas previamente estabelecidas por Coutinho (2012).

Todo material utilizado, tanto na dosagem quanto na replicagem das amostras, foi misturado em um misturador mecânico, utilizando-se 4kg de massa por vez. Essa medida foi tomada com o intuito de se obter uma mistura mais homogênea e com a menor influência do fator humano no processo.

Na fase de dosagem, foram compactados CPs para cada mistura com um N (número de giros) de projeto igual a 100. Para as misturas 1 e 2 utilizou-se o CAP 50/70 convencional. Para a mistura 3 utilizou-se o CAP 50/70 modificado com 4% de EVA. Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros de dosagem de cada uma das misturas para todos os CPs. Para a avaliação do V_v mediu-se a densidade máxima do material (G_{mm}) através do Rice Test, utilizando os procedimentos da norma americana ASTM D2041 (2000), logo, a nomenclatura G_{mm} nos resultados mostrados, em detrimento a DMT (Densidade Máxima Teórica).

Tabela 2: Parâmetros de dosagem

Parâmetros	Mistura 1			Mistura 2			Mistura 3		
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 1	CP 2	CP 3	CP 1	CP 2	CP 3
Teor de ligante (%)	5,0			5,5			5,7		
V_v (%)	4,0	3,6	4,0	3,9	3,9	4,3	3,9	3,9	4,0
G_{mm}	2,385			2,433			2,428		

O teor de projeto de CAP das misturas 1 e 2, que utilizaram CAP convencional foi de 5,0% e 5,5% respectivamente, em função da diferença das curvas granulométricas e das diferentes origens mineralógicas dos materiais utilizados. O teor de projeto de CAP da Mistura 3, que utilizou CAP modificado com EVA, foi ligeiramente superior aquele encontrado para as outras duas misturas avaliadas, 5,7%. É esperado o aumento do teor de projeto de CAP em misturas que utilizem CAPs modificados com EVA devido ao aumento da viscosidade do mesmo. Em seguida foram replicados cinco CPs para cada mistura para a realização dos ensaios mecânicos. Admitiu-se uma variação de 0,4% no V_v para mais ou para menos para as amostras ensaiadas.

3.3. ESCOLHA DAS METODOLOGIAS DE ENSAIO DE MR

Para a realização desse trabalho, fez-se uma investigação das principais normas nacionais e internacionais para a obtenção do MR para misturas asfálticas em laboratório. Optou-se por verificar as normas mais referenciadas na literatura, as citadas como

referência nos manuais dos equipamentos utilizados para o ensaio, como também, a nova norma brasileira para obtenção do MR de misturas asfálticas, a ABNT NBR 16018 (2011).

As normas investigadas foram:

- BSi DD 213(1993) – Inglaterra;
- DNER ME 133(1994) – Brasil;
- ASTM D4123 (1995) – Estados Unidos;
- AS 2891.13.1 (1995) – Austrália;
- AASHTO TP31(1996) – Estados Unidos;
- prEN 12967-26 (2003) – Europa;
- DNIT ME 135 (2010) – Brasil;
- ABNT NBR 16018 (2011) – Brasil.

No estudo dessas normas, fez-se um levantamento das recomendações descritas pelas mesmas sobre os parâmetros que acredita-se desempenhar maior influência nos resultados obtidos no ensaio de MR. Quais sejam:

- Tipo de carregamento (hidráulico ou pneumático);
- Frequência de ensaio;
- Nº de ciclos na fase de pré-condicionamento;
- Nº de ciclos na fase de condicionamento;
- Nº de ciclos utilizados para o cálculo do MR;
- Temperatura de ensaio;
- Período mínimo de estabilização da temperatura;
- Utilização de faixas de temperaturas distintas;
- Coeficiente de Poisson (determinado ou assumido);
- Método para o cálculo do MR total;
- Método para o cálculo do MR instantâneo.

Adicionalmente, foram feitas observações relacionadas a cada norma, principalmente sobre como estas definem os deslocamentos total e instantâneo. Além disso, indicações particulares de cada norma para o procedimento de ensaio foram citadas quando

julgou-se necessário. A Tabela A1 que sintetiza todas essas informações encontra-se no Apêndice A deste trabalho.

Após a análise das principais metodologias, optou-se por utilizar as metodologias brasileiras DNER ME 133 (1994) do DNER e a ABNT NBR 16018 (2011). Além destas, comparou-se os resultados com os obtidos diretamente do *software* do equipamento pneumático de fabricação da empresa SIGEO. A razão dessa escolha é o grande banco de dados de resultados de MR obtidos no LMP com o uso deste equipamento.

A escolha da metodologia DNER ME 133 (1994), mais antiga, em detrimento a DNIT ME 135 (2010), se deu devido à baixa especificidade da norma mais atual em relação a diversos parâmetros de ensaio, por exemplo: número de ciclos utilizados na fase de pré-condicionamento, número de ciclos utilizados na fase de condicionamento, escolha dos ciclos utilizados para o cálculo do MR, período de estabilização da temperatura de ensaio, entre outros. A baixa especificidade desses diversos parâmetros deixam muitas decisões a cargo do operador, podendo ocasionar baixa confiabilidade nos resultados.

A norma ABNT NBR 16018 (2011) foi escolhida para verificar o impacto da nova metodologia nos resultados de MR obtidos no Brasil. Esta se encontra em alinhamento com as recomendações das principais normas internacionais, por isso, optou-se por utilizar apenas as citadas metodologias brasileiras. Seguem abaixo as principais recomendações de cada uma das metodologias escolhidas que foram utilizadas para a realização dos ensaios neste trabalho (Tabela 3).

Tabela 3: Principais recomendações das metodologias selecionadas

Procedimento/ Parâmetro	ABNT NBR 16018 (2011)	DNER ME 133 (1994)	SIGEO
Tipo de carregamento	Hidráulico/ Pneumático	Pneumático	Pneumático
Frequência (Hz)	1	1	1
Ciclos de pré-condicionamento	50	- 200 ciclos ou até a obtenção de registro mensurável no oscilógrafo - Carregamento máximo → 30% da RT	- Incrementos de carga até a obtenção de um registro mensurável no oscilógrafo
Ciclos de condicionamento	15	500	60
Ciclos para o cálculo do MR	15 (divididos em três grupos de cinco)	3 (para os ciclos nº: 300, 400 e 500)	15 (divididos em três grupos para diferentes incrementos de carga)
Temperatura (°C)	25	30	25
Período de estabilização da temperatura	4 h (mínimo)	Não especifica	Não especifica
Coef. de Poisson	Determinado/ Assumido ($\nu = 0,30$)	Assumido ($\nu = 0,30$)	Assumido ($\nu = 0,30$)
Cálculo do MR Total	Sim	Não	Não
Cálculo do MR Instantâneo	Sim	Sim	Sim

3.4. ENSAIOS DE MR

Os ensaios de MR foram realizados seguindo as metodologias previamente selecionadas utilizando uma prensa pneumática. Pretendia-se realizar os ensaios também em prensa hidráulica, mesmo quando não havia indicação da utilização dessa forma de

carregamento nas recomendações das metodologias selecionadas. Porém, a prensa hidráulica disponível no LMP para a realização dos ensaios, UTM-25, fornece os resultados de maneira equivocada. Constatou-se que o *software* da UTM-25 utiliza, para o cálculo do MR, apenas o deslocamento total, ou seja, a variação entre o ponto inicial e o pico de deformação decorrente da aplicação da carga ignorando toda a informação de deslocamento durante o período de repouso, omitindo essas leituras, também, nos arquivos de deslocamento *versus* tempo gerados, impedindo, inclusive, o tratamento dos dados com um algoritmo externo. O funcionamento da UTM-25, assim como as definições dos deslocamentos utilizados para o cálculo do MR estão melhor detalhados no Apêndice B.

A prensa utilizada neste trabalho foi fabricada pela empresa SIGEO, que utiliza carregamento pneumático. Os deslocamentos foram medidos por dois LVDTs posicionados na lateral dos CPs de forma a captar as deformações no plano perpendicular à aplicação da carga. Na Figura 16 pode-se observar o esquema de posicionamento dos LVDTs utilizados neste ensaio.

Figura 16: Esquema de posicionamento dos LVDTs no ensaio de MR



O controle da temperatura de ensaio e o período de estabilização foram realizados na capela do próprio equipamento de ensaio. Para isso, controlou-se tanto a temperatura da

câmara quanto do interior do CP, isso é possível com a utilização de dois termômetros, um medindo a temperatura da câmara, e outro instalado no interior de um CP, posicionado dentro da câmara, mas não ensaiado.

3.5. TRATAMENTO DOS RESULTADOS PROVENIENTES DOS ENSAIOS DE MR

Os cálculos dos valores de MR para as amostras ensaiadas seguindo as metodologias das normas DNIT ME 133 (1994) e ABNT NBR 16018 (2011) foram realizados através de uma planilha no Excel desenvolvida para a obtenção do deslocamento instantâneo dos ciclos utilizados para o cálculo do MR de acordo com a metodologia utilizada para a realização do ensaio. Para a metodologia da SIGEO os valores de MR foram obtidos diretamente do *software* nativo do equipamento.

Para o cálculo do MR, as normas DNER ME 133 (1994) e ABNT NBR 16018 (2011) utilizam as Equações 1 e 2. Tomou-se a liberdade de utilizar a mesma notação para ambas a fim de facilitar a comparação dos resultados. Utilizou-se, também, as mesmas unidades, optando-se pelo sistema universal, porém as devidas transformações foram observadas.

Equação 1: Cálculo do MR – DNER ME 133 (1994)

$$MR = \frac{F}{\Delta H} \cdot (0,9976v + 0,2692)$$

Equação 2: Cálculo do MR – ABNT NBR 16018 (2011)

$$MR = \frac{F}{\Delta H} \cdot (v + 0,27)$$

onde:

MR = Módulo de Resiliência, em MPa;

F = Carga vertical aplicada diametralmente no CP, em N;

Δ = Deslocamento instantâneo horizontal do ciclo de ensaio, em mm;

H = Altura do CP, em mm;

ν = Coeficiente de Poisson.

A obtenção dos deslocamentos instantâneos e totais para o cálculo do MR é realizada através da subdivisão do pulso de carregamento em: (i) pico de deslocamento, (ii) porção reta do caminho de descarregamento, (iii) porção de recuperação e uma porção curva que une o caminho de descarregamento à porção de recuperação. A divisão dessas porções é feita através de regressões lineares e hiperbólicas, tangentes a curva do pulso de deslocamento. Uma explicação mais aprofundada da obtenção destes deslocamentos pode ser encontrada em Bernucci *et al.* (2007). A Figura 17 traz a representação gráfica da subdivisão do pulso de deslocamento durante o ensaio de MR.

A norma DNER ME 133 (1994) não especifica a metodologia para obtenção dos deslocamentos instantâneo e total. Utilizou-se, então, a metodologia apresentada na norma ABNT NBR 16018 (2011), similar à apresentada na norma americana AASHTO TP31 (1996), evidenciado o alinhamento da nova norma brasileira em relação às normas internacionais. Os deslocamentos instantâneo e total estão representados na Figura 18, adaptada da norma ABNT NBR 16018 (2011).

Figura 17: Representação gráfica da divisão do pulso de deslocamento (Bernucci *et al.*, 2007)

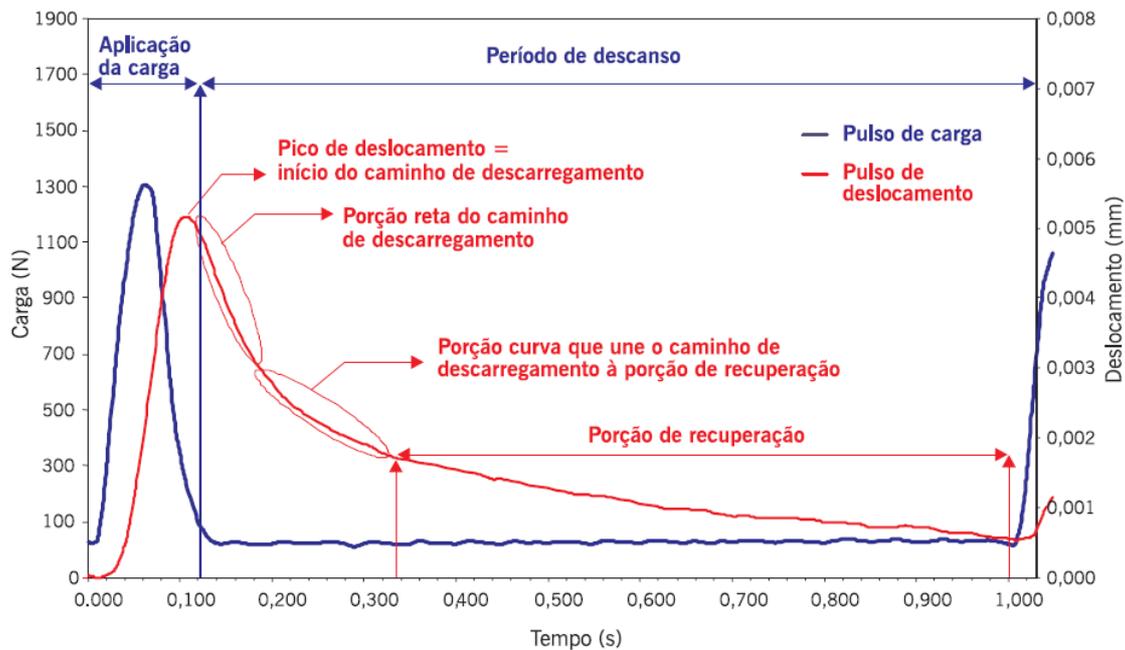
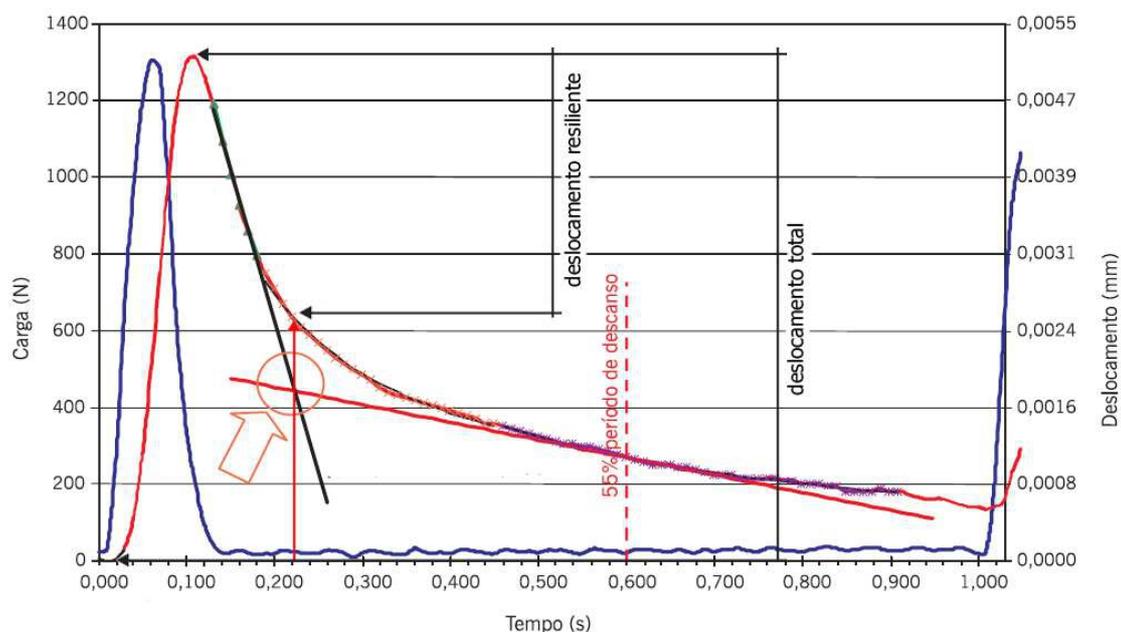


Figura 18: Definições de deslocamento instantâneo e total para o cálculo do MR para misturas asfálticas – Adaptado de Bernucci *et al.*(2007)



4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MR

Foram realizados ensaios nas Misturas 1, 2 e 3 utilizando-se as metodologias previamente descritas, na prensa pneumática (SIGEO). Seguem, abaixo nas Tabelas 4, 5 e 6, os resultados de MR obtidos em MPa, assim como os valores de desvio padrão e Coeficiente de Variação (CV) para as amostras avaliadas.

- SIGEO

Tabela 4: Resultados de MR – Prensa pneumática: Metodologia SIGEO

Mistura 1			Mistura 2			Mistura 3		
CP	Vv (%)	MR (MPa)	CP	Vv (%)	MR (MPa)	CP	Vv (%)	MR (MPa)
1	4,0	4370	1	4,3	3724	1	4,4	4563
2	3,6	4247	2	4,3	3753	2	4,4	5371
3	4,0	3601	3	3,9	3736	3	4,3	5702
4	4,1	4232	4	4,0	3896	4	4,3	5270
5	4,0	4076	5	3,8	3911	5	4,4	5367
MR _{médio}		4105	MR _{médio}		3804	MR _{médio}		5255
Desv. padrão		301	Desv. padrão		92	Desv. padrão		420
CV (%)		7	CV (%)		2	CV (%)		8

- ABNT NBR 16018 (2011)

Tabela 5: Resultados de MR – Prensa pneumática: ABNT NBR 16018 (2011)

Mistura 1			Mistura 2			Mistura 3		
CP	Vv (%)	MR (MPa)	CP	Vv (%)	MR (MPa)	CP	Vv (%)	MR (MPa)
1	4,0	4309	1	4,3	3786	1	4,4	5105
2	3,6	3970	2	4,3	3878	2	4,4	5273
3	4,0	4243	3	3,9	4184	3	4,3	4916
4	4,1	3867	4	4,0	4170	4	4,3	5434
5	4,0	4351	5	3,8	4346	5	4,4	5127
MR _{médio}		4148	MR _{médio}		4073	MR _{médio}		5171
Desv. padrão		216	Desv. padrão		233	Desv. padrão		194
CV (%)		5	CV (%)		6	CV (%)		4

- DNER ME 133 (1994)

Tabela 6: Resultados de MR – Prensa pneumática: DNER ME 133 (1994)

Mistura 1			Mistura 2			Mistura 3		
CP	Vv (%)	MR (MPa)	CP	Vv (%)	MR (MPa)	CP	Vv (%)	MR (MPa)
1	4,0	4108	1	4,3	3778	1	4,4	4864
2	3,6	3846	2	4,3	3595	2	4,4	5156
3	4,0	4227	3	3,9	3762	3	4,3	4651
4	4,1	3434	4	4,0	3718	4	4,3	4986
5	4,0	3892	5	3,8	3603	5	4,4	4902
MR _{médio}		3901	MR _{médio}		3691	MR _{médio}		4912
Desv. padrão		304	Desv. padrão		87	Desv. padrão		184
CV (%)		8	CV (%)		3	CV (%)		4

Segue abaixo na Tabela 7 o resumo dos módulos encontrados para as misturas nas metodologias especificadas. Nesta tabela consta a média dos valores obtidos para cada mistura, como também, o desvio padrão entre os resultados. Segue na Figura 19, um gráfico de barras para melhor visualização destes resultados.

Tabela 7: Resumo dos resultados de MR (MPa) obtidos em prensa pneumática

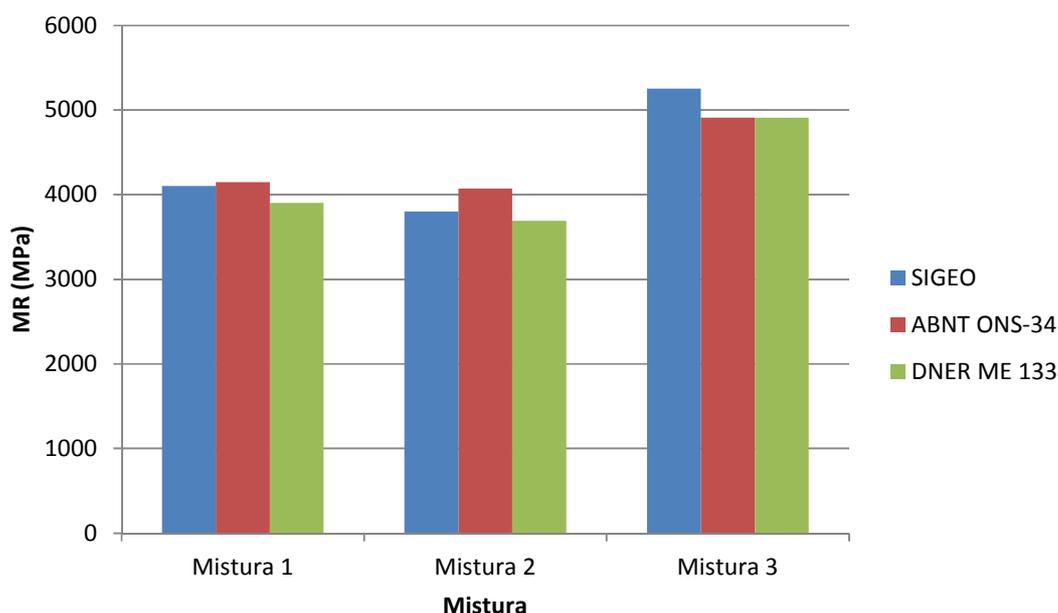
Mistura/Norma	SIGEO	ABNT NBR 16018 (2011)	DNER ME 133 (1994)	Média	Desv. padrão	CV (%)
Mistura 1	4105	4148	3901	4052	174	4
Mistura 2	3804	4073	3691	3856	270	7
Mistura 3	5255	5171	4912	5112	183	4

Pode-se observar na Tabela 7, que os resultados de MR obtidos através do uso das três metodologias estudadas foram semelhantes, apresentando CV mínimo de 4% e máximo de 7%. Considerando fatores como heterogeneidade dos materiais e fatores humanos na montagem e realização do ensaio, acredita-se que as três metodologias levaram praticamente ao mesmo resultado para todas as misturas avaliadas.

Os resultados obtidos através do uso da norma DNER ME 133 (1994) apresentaram os menores valores de MR para as três misturas ensaiadas. Esse comportamento já era esperado, visto que a temperatura de ensaio recomendada é de 30°C (superior a temperatura de ensaio de 25°C sugerida pelas outras metodologias), acarretando na diminuição da

viscosidade do ligante na amostra, e, conseqüentemente, no aumento das deformações computadas durante o ensaio. Pode-se observar, que os resultados obtidos com a utilização dessa norma apresentaram a maior dispersão entre os valores obtidos para cada mistura (maiores CVs), o que leva a crer que, dependendo do tipo de mistura a ser ensaiada por essa metodologia, a repetibilidade dos resultados é afetada.

Figura 19: Gráfico de barras - Resumo dos resultados de MR obtidos em prensa pneumática



Os resultados obtidos com o uso da norma ABNT NBR 16018 (2011) apresentaram-se superiores, porém, os resultados são similares aqueles obtidos através da utilização da metodologia proposta pela SIGEO. As duas metodologias recomendam que o ensaio seja realizado a temperatura de 25°C. A maior diferença encontrada entre essas duas metodologias é em relação aos ciclos de condicionamento. A metodologia da SIGEO recomenda a aplicação de 60 ciclos de condicionamento, sendo utilizados para o cálculo do MR os ciclos n°40, 50 e 60, enquanto a norma ABNT NBR 16018 (2011) recomenda apenas 15 ciclos durante a fase de condicionamento, todos sendo utilizados para o cálculo do MR, em três grupos de cinco ciclos.

A análise em separado dos resultados obtidos através da utilização destas duas metodologias (Tabela 8) revelou que para as misturas 1 e 3 a variação (CV) encontrada nos valores de MR foi de 1%. A variação (CV) encontrada para os resultados referentes a mistura 2 foi ligeiramente superior, 5%, comportamento análogo aquele encontrado para a análise do conjunto total de dados referentes a esta mistura, que apresentou a maior variação entre todas as misturas estudadas, com CV equivalente a 7%.

Tabela 8: Comparação dos resultados de MR (MPa) obtidos através do uso das SIGEO e ABNT NBR 16018 (2011)

Mistura/Norma	SIGEO	ABNT ONS-34 (2011)	Média MR (MPa)	Desv. Padrão MR (MPa)	CV (%)
Mistura 1	4105	4148	4127	30	1
Mistura 2	3804	4073	3939	190	5
Mistura 3	5255	5171	5213	59	1

Da análise dos resultados obtidos, pode-se concluir que os resultados de MR para misturas asfálticas são mais impactados pela temperatura de ensaio do que pelo número de ciclos de condicionamento. Quanto à repetibilidade, também pode-se observar que, os resultados de MR obtidos através do uso da norma DNER ME 133 (1994) e da metodologia da SIGEO apresentaram o maior $CV_{\text{médio}}$ (Tabela 9) de todas metodologias estudadas, como também, as maiores amplitudes (diferença entre o maior e o menor valor de CV). Os resultados obtidos através do uso da norma ABNT NBR 16018 (2011), mesmo que não tenham apresentado o menor $CV_{\text{médio}}$, mostraram maior constância, o que é evidenciado pela menor amplitude dos valores encontrados através do uso dessa metodologia, para todas as misturas.

Tabela 9: Coeficientes de variação dos resultados de MR encontrados para cada mistura nas metodologias estudadas

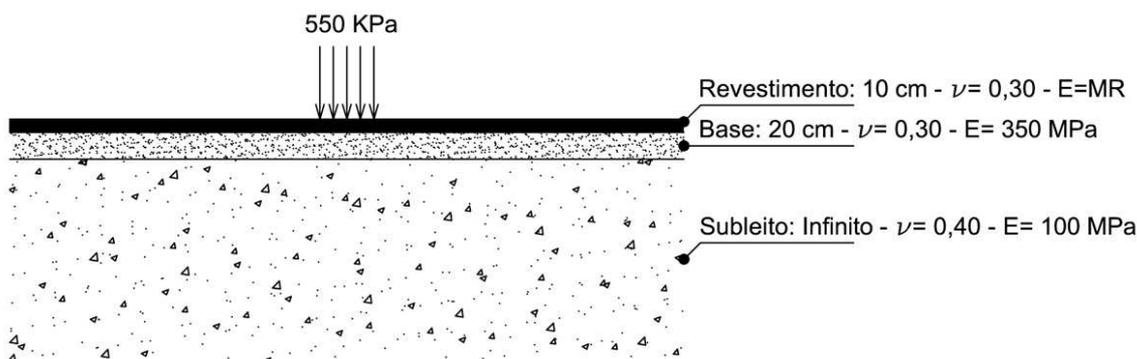
Norma/Mistura	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3	Média (%)	Amplitude
SIGEO	7	2	8	6	6
ABNT NBR 16018 (2011)	5	6	4	5	2
DNER ME 133 (1994)	8	2	4	5	6

4.2. O IMPACTO DO USO DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OBTENÇÃO DO MR NA ANÁLISE DE UM PAVIMENTO PADRÃO

Para a avaliação da magnitude da influência que a variação do MR de misturas asfálticas exerce no comportamento do pavimento como um todo, não apenas na mistura asfáltica em si, utilizou-se um *software* (CAP3D) para a análise das tensões e das deformações das camadas do pavimento. Este *software*, que vem sendo desenvolvido no LMP, é um programa para análise de pavimentos asfálticos através do Método dos Elementos Finitos (MEF), atualmente, sendo capaz de tratar modelos planos, axissimétricos e tridimensionais, utilizando elementos de diferentes formas (triângulos, quadriláteros, tetraedros e hexaedros) e ordens de interpolação (linear e quadrática) (Bastos *et al.*, 2012).

Para a análise, adotou-se um pavimento padrão constituído de revestimento e base, assentados sob o subleito. A geometria adotada para a análise, as características dos materiais granulares e o carregamento axissimétrico (550kPa) aplicado foi semelhante aquele utilizado no estudo de Silva e Holanda (2011). Para a modelagem do problema, utilizou-se uma malha mista, onde as camadas de revestimento e de base foram modeladas com uma malha de elementos finitos, enquanto o subleito foi modelado como uma camada de elementos finitos e infinitos, para melhor representação da realidade. A Figura 20 traz uma representação do pavimento padrão utilizado para a análise e suas características.

Figura 20: Pavimento padrão



Foram realizadas nove análises para a estrutura do pavimento padrão, visto que estão sendo estudadas três metodologias de ensaio e três misturas asfálticas. Para a análise,

mantiveram-se constante as espessuras das camadas e as características das camadas granulares (coeficiente de Poisson e Módulo de Elasticidade (E)) e variou-se as características da camada de revestimento. Para os dados de entrada referentes à camada de revestimento considerou-se $E=MR$ (ou seja, foi realizada uma análise elástica linear) e adotou-se o coeficiente de Poisson assumido por cada metodologia em estudo. Como todas as metodologias recomendam que se utilize $\nu=0,30$ (quando não há possibilidade de se obtê-lo), este manteve-se constante para todas as análises.

Os métodos de dimensionamento de pavimentos mecanístico-empíricos, como o MEPDG da AASHTO (NCHRP, 2004), usualmente baseiam-se na proposição de uma estrutura e na posterior verificação da satisfação de critérios de desempenho estabelecidos inicialmente. Estes critérios buscam assegurar bom desempenho ao pavimento em relação à vida de fadiga e a deformação permanente. Admite-se que o desempenho do pavimento, no que diz respeito a esses fatores, está correlacionado às deformações de tração e de compressão que ocorrem em pontos críticos da estrutura, tais como: (i) deslocamento vertical da superfície (para deformação permanente), (ii) tensões/deformações de tração na face inferior do revestimento (trincamento por fadiga) e (iii) tensões/deformações verticais de compressão nas diversas camadas (para deformação permanente) (Franco, 2007; Bastos *et al.*, 2012). Para a análise do pavimento padrão realizada neste trabalho foram observados:

- Deslocamento vertical na superfície do revestimento;
- Tensão de tração na face inferior do revestimento;
- Tensão de compressão no topo do subleito.

As análises foram realizadas e foram observados os pontos acima descritos. Os resultados estão expostos nas Tabelas de 10 a 12. Gráficos de barras para a melhor visualização dos resultados estão representados nas Figuras 21 a 23.

Tabela 10: Análise do deslocamento vertical (mm) na superfície do revestimento

Critério	Deslocamento vertical (mm)		
	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3
DNER ME 133 (1994)	-0,43695	-0,44298	-0,41750
ABNT NBR 16018 (2011)	-0,43509	-0,43757	-0,41877
SIGEO	-0,44098	-0,44538	-0,42280
Média	-0,43767	-0,44198	-0,41969
Desvio padrão	0,00301	0,00400	0,00277
CV(%)	0,69	0,91	0,66

Tabela 11: Análise da tensão de tração (MPa) na face inferior do revestimento

Critério	Tensão de tração (MPa)		
	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3
DNER ME 133 (1994)	1,0836	1,0219	1,2924
ABNT NBR 16018 (2011)	1,0912	1,0772	1,2784
SIGEO	1,0422	0,9978	1,2341
Média	1,0723	1,0323	1,2683
Desvio padrão	0,0264	0,0407	0,0304
CV(%)	2,46	3,94	2,40

Tabela 12: Análise da tensão de compressão (MPa) no topo do subleito

Critério	Tensão de compressão (MPa)		
	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3
DNER ME 133 (1994)	-0,061774	-0,062986	-0,057838
ABNT NBR 16018 (2011)	-0,061464	-0,061627	-0,058095
SIGEO	-0,062586	-0,063466	-0,058914
Média	-0,061941	-0,062693	-0,058282
Desvio padrão	0,000579	0,000954	0,000562
CV(%)	0,93	1,52	0,96

Figura 21: Gráfico de barras - Análise do deslocamento vertical (mm) na superfície do revestimento

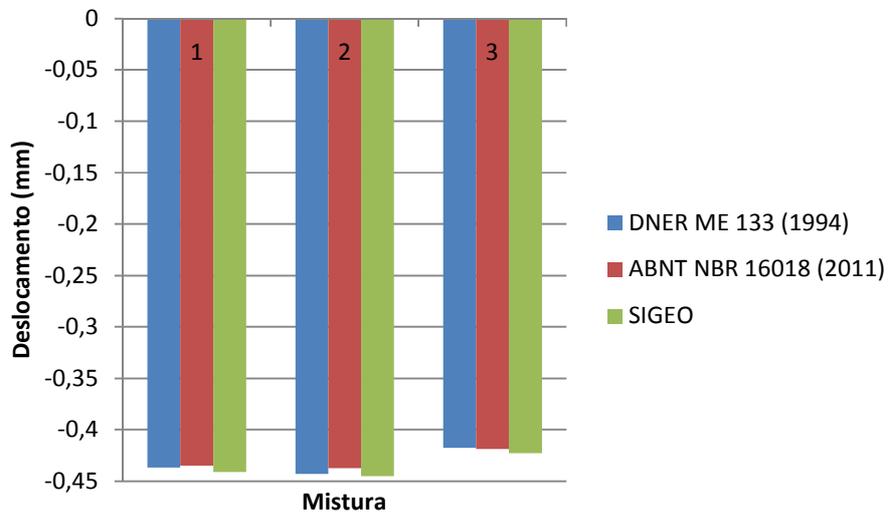


Figura 22: Gráfico de barras - Análise da tensão de tração (MPa) na face inferior do revestimento

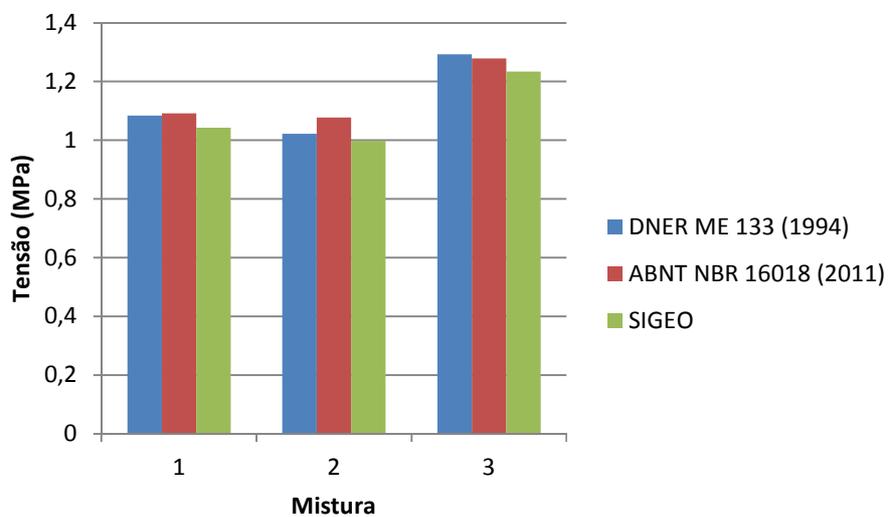
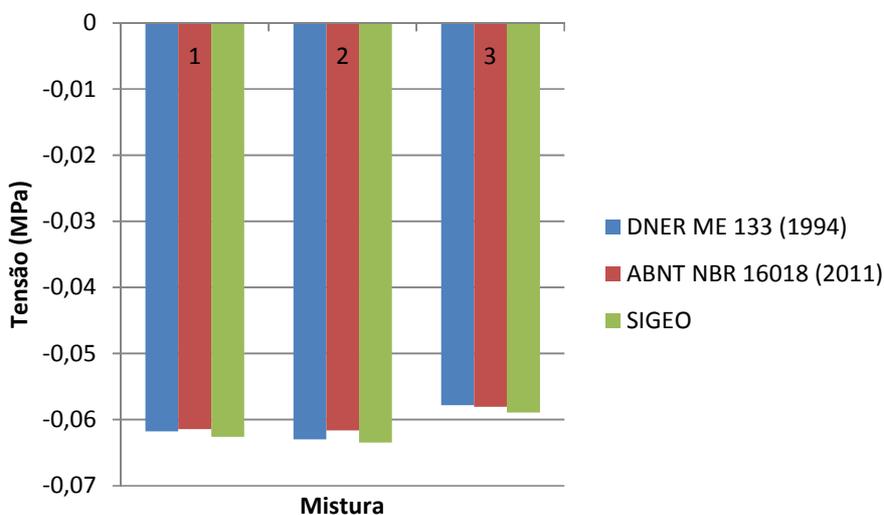


Figura 23: Gráfico de barras - Análise da tensão de compressão no topo do subleito



‘ A partir da análise dos três critérios observados, pode-se inferir que a resposta do pavimento foi muito similar para os critérios de deslocamento vertical na superfície do revestimento e de tensão de compressão no topo do subleito (Tabelas 10 e 12). Os máximos CVs encontrados foram de 0,91 e 1,52%, respectivamente. Esses resultados levam a crer que, para esses quesitos, que buscam representar o desempenho do pavimento quanto à deformação permanente, para a estrutura avaliada, não houve influência da metodologia aplicada para obtenção do MR para as misturas asfálticas.

O critério analisado que apresentou maior sensibilidade a variação dos valores de MR adotados para a camada de revestimento foi o de tensão de tração na face inferior do revestimento (Tabela 11). Os CVs obtidos foram: (i) Mistura 1: 2,46%, (ii) Mistura 2: 3,94% e (iii) Mistura 3: 2,40%. Pode-se observar, no entanto, que o menor CV obtido tanto nesse critério, quanto para os outros analisados, foi encontrado para a Mistura 2, que apresenta o menor valor MR médio entre todas as misturas estudadas. Deste comportamento, pode-se inferir que, mesmo que para revestimentos mais rígidos, como o CA em questão, a influência da metodologia de obtenção do MR é baixa, porém, para pavimentos que apresentem menor rigidez, como Tratamentos Superficiais (TS) e Areias Asfálticas Usinadas a Quente (AAUQ), o impacto pode vir a ser mais significativo.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho realizou-se uma avaliação da influência de diferentes metodologias para a obtenção do MR para misturas asfálticas. Foi realizado um levantamento das principais normativas nacionais e internacionais e observou-se que, estas divergem em diversas recomendações para a realização do ensaio, como por exemplo: temperatura de ensaio, número de ciclos de pré-condicionamento e número de ciclos de condicionamento.

Dentre as normas nacionais, a ABNT NBR 16018 (2011) possui o texto mais específico, sendo a única que descreve os procedimentos para a obtenção dos deslocamentos utilizados para o cálculo do MR, como também traz recomendações para a obtenção do coeficiente de Poisson, tratamento dos dados quando se faz diferentes montagens de *LVDTs*, incluindo ainda o cálculo do MR total. Esta norma foi elaborada baseada nas principais metodologias internacionais, como ASTM D4123 (1995) e AASHTO TP-31 (1996).

A outra norma brasileira em vigor, DNIT ME 135 (2010), não traz recomendações para diversos parâmetros de ensaio como: frequência de carregamento, número de ciclos de pré-condicionamento e número de ciclos de condicionamento e período para estabilização da temperatura de ensaio. A utilização dessa norma para a realização do ensaio de MR para misturas asfálticas, deixa a cargo do operador decisões sobre parâmetros que podem vir a influenciar os resultados, logo não se recomenda o uso desta norma para a realização do ensaio.

A partir dos resultados dos ensaios de MR para misturas asfálticas realizados em prensa pneumática, através do uso das metodologias SIGEO, DNIT ME 133 (1994) e ABNT NBR 16018 (2011) concluiu-se que, para as misturas do tipo CA não pouca influência da metodologia de ensaio nos resultados obtidos. Observou-se, porém, que, o parâmetro que levou a uma maior variação nos resultados foi à temperatura.

Dentre as metodologias ensaiadas, a que apresentou melhor desempenho foi a ABNT NBR 16018 (2011). Esta apresentou menor sensibilidade no quesito repetibilidade quanto à mistura ensaiada, como também menor dispersão dos resultados obtidos para cada

mistura. Devido a estes fatores, como também, a maior especificidade do texto, recomenda-se a utilização desta norma para a realização de ensaios de MR para misturas asfálticas no Brasil.

Da análise de um pavimento padrão, através do *software CAP3D*, onde os valores de MR foram utilizados como dados de entrada para a rigidez da camada de revestimento, concluiu-se que, não houve influência significativa da metodologia utilizada para a obtenção do MR para misturas asfálticas na análise de tensões e deformações deste pavimento.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dentre as recomendações para trabalhos futuros pode-se citar:

- Verificação da metodologia de obtenção e de processamento dos dados dos principais equipamentos utilizados para obtenção do MR;
- Verificação do impacto nos resultados de MR devido ao procedimento de medição dos deslocamentos utilizado: LVDTs acoplados à face do CP *versus* diametralmente;
- Verificação do impacto nos resultados de MR devido à utilização de coeficiente de Poisson determinado em ensaio;
- Desenvolvimento de um programa de obtenção e processamento dos dados para o ensaio de MR na UTM-25;
- Verificação da influência da metodologia de obtenção do MR para outros tipos de misturas asfálticas, especialmente misturas menos rígidas;
- Análise da influência da variação do MR na análise de pavimentos mais delgados e/ou com menor rigidez.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, A. E. V. **Avaliação do uso de polímero EVA, resíduo da indústria de calçados (EVAR) e aditivos no desempenho reológico de ligante asfáltico de petróleo.** 2009. Tese (Doutorado em Química) - Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **TP 31-96.** Standard Method of Test for Determining resilient Modulus of bituminous Mixtures by indirect tension. *In:* AASHTO Provisional Standard TP-31-96 Edition 1B. Washington, D.C., 1996.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **TP 62-03.** Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures. Washington, D.C., 2005.

ARAGÃO, F.T.S; LUTIF, J.E.S; KIM, Y.R; SOARES, J.B. **Avaliação da Zona de Restrição como Critério Limitador em Misturas Asfálticas Utilizadas em Vias de Baixo Volume de Tráfego.** *In:* XXI CONGRESSO DE ENSINO E PESQUISA EM TRANSPORTES, ANPET, Rio de Janeiro, 2007.

ARAÚJO, P.C.J.; FERREIRA, W.L.G; CASTELO BRANCO, V.T.F; SOARES, J.B. **Considerações sobre o Ensaio de Compressão Diametral no estudo de Materiais de Pavimentação.** *In:* XXIII Congresso de Pesquisa e Ensaio em Transportes, ANPET, Vitória, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16018.** Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. Rio de Janeiro, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4123**. Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures. Philadelphia, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 2041** – Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. Philadelphia, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 3497-79**. Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures. Philadelphia, 2003.

AUSTRALIAN STANDARD. AS 2891.13.1. Methods of sampling and testing asphalt. Method 13.1: Determination of the resilient modulus of asphalt – Indirect tensile method. Sidney, 1995. 7p.

BARKSDALE, R. D. J.; ALBA, J.; KHOSLA, N. P.; KIM, R.; LAMBE, P. C.; RAHMAN, M. S. **NCHRP Web Document 14: Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design**. NCHRP Project 1-28. TRB, National Research Council, Washington, D.C. 1997.

BASTOS, J. B. S.; HOLANDA, A. S.; BARROSO, S. H. A. Influência da Variação da Umidade na Análise dos Pavimentos da Região Metropolitana de Fortaleza. *In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 2012, Porto de Galinhas. **Anais...** XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Porto de Galinhas, 2012. p. 1-8

BERNUCCI, L.B., MOTTA, L.M.G., CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. 1. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2007.

BESSA, I.S. **Avaliação do processamento digital de imagens como ferramenta para caracterização de agregados e misturas asfálticas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **DD213**: Determination of the Indirect Tensile Stiffness modulus of bituminous mixtures. Londres, 1993. 16p.

BRITO, L.A.T. **Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CAPITÃO, S. **Caracterização mecânica de misturas betuminosas de alto módulo de deformabilidade**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2003.

CHRISTENSEN, R.M. **Theory of Viscoelasticity**. 2. ed. New York: Academic, 1982.

COUTINHO, R.P. **Análise do comportamento viscoelástico de materiais asfálticos considerando o efeito da temperatura**. 2009. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, 2009.

COUTINHO, R.P. **Utilização da parte fina de misturas asfálticas para avaliação do dano por fadiga**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

COUTINHO, R.P.; BABADOPULOS, L.F.A.L.; CASTELO BRANCO, V.T.F. ; SOARES, J.B. **Proposição de um método de dosagem para representação da porção fina de misturas asfálticas**. *In*: XVI CILA CONGRESSO IBERO-LATINO AMERICANO DE ASFALTO, 2011, Rio de Janeiro, 2011.

DI BENEDETTO, H.; CORTÉ, J. **Materiaux routiers bitumineux 2**. França: Hermès/Lavoisier, 2004. 288p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 078**: Agregado Graúdo – Adesividade ao Ligante Betuminoso – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 086**: Agregado – Determinação do Índice de Forma – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 133**: Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 138**: Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 084**: Agregado Miúdo – Determinação da Densidade Real – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 081**: Agregados – Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 083**: Agregados – Análise Granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 035**: Agregados – Determinação da Abrasão “*Los Angeles*” – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **031/2006 - ES**. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço, Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **135/2010 - ME**. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DORMON, G.M.; METCALF, C. T. **Design Curves for Flexible Pavements Based on Layered System Theory**. Highway Research Record 71, Highway Research Board. Washington, D.C., 1965.

EUROPEAN STANDARD. **prEN 12967-26**. Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness. European Committee for Standardization. 2003.

FALCÃO, M. F. B.; SOARES, J. B. **Considerações sobre o Ensaio de Compressão Diametral no estudo de Materiais de Pavimentação**. *In: XVI Congresso de Pesquisa e Ensaio em Transportes, ANPET, Natal, 2002.*

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Test Method for Determining the Creep Compliance, Resilient Modulus and Strength of Asphalt Material Using the Indirect Test Tensile Device**. FHWA-LTTP Protocol P07. Version 1.1. 2001.

FRANCO, F.A.C.P. **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

HU, S.; ZHOU, F.; HU, X.; SCULLION, T.; QI, X.; WALUBITA, L. F.; CLAROS, G. **Consideration of HMA Resilient Modulus (Mr) for M-E Pavement Design and Analysis**. *Journal of the Association of Asphalt Pavement Technologists*, Vol. 77. 2008. pp. 663-702.

HUANG, Y.H. **Pavement Analysis and Design**. 2. ed. Englewood-Cliffs: Prentice-Hall, 1993. 767 p.

HVEEM, F.N. **Pavement Deflection and Fatigue Failures**. Bulletin 114, HRB (TRB), Washington – DC, 1955. p 43-87.

LACROIX, A.; KHANDAN, M.; KIM, Y.R. **Predicting the Resilient Modulus of Asphalt Concrete from the Dynamic Modulus**. Journal of Transportation Research Board, No. 2001, National Research Council, Washington, D.C., 2007. pp. 132-140.

LACROIX, A.; KIM, Y.R.; RANJITHAN, S.R. **Backcalculation of the Dynamic Modulus from the Resilient Modulus of Asphalt Concrete Using an Artificial Neural Network**. Journal of Transportation Research Board, No. 2057, National Research Council, Washington, D.C., 2008. pp. 107-113.

LOVE, A.E.H. **A treatise on the mathematical theory of elasticity**. 4. ed. New York: Dover, 1944.

MEDEIROS JR., M.S. **Estudo de Interconversão entre o Módulo Complexo e a Creep Compliance na Caracterização de Misturas Asfálticas**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997. 380p.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2. ed.. Rio de Janeiro: Edição dos autores, v. 1, 2005. 570 p.

MONISMITH, C. L. **Resilient modulus testing: Interpretation of laboratory results for design purposes**. Proceedings of the workshop on resilient modulus testing. Oregon State University, Corvallis, 1989.

MOTTA, L.M.G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; Critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. 1991. Tese (Doutorado em Engenharia

Civil) – Programa de Pró-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

MOURA, E.; BERNUCCI, L.L.B. **Estudos dos deslocamentos verticais e horizontais em corpos-de-prova Marshall em ensaios de Módulo de Resiliência e de Resistência à tração.** *In: XVIII CONGRESSO DE ENSINO E PESQUISA EM TRANSPORTES – ANPET*, v. 1, p. 150-161. Florianópolis, 2004.

PAPAZIAN, H.S. **The response of linear viscoelastic materials in the frequency domain with emphasis on asphaltic concrete.** *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENTS*, Michigan, USA, 1962. p. 454-63.

KERKHOVEN, R.E.; DORMON, G.M. **Some Considerations on the California Bearing Ratio Method for the Design of Flexible Pavements.** Shell Bitumen Monograph N° 1, Amsterdam, 1953.

ROQUE, R; BUTLLAR, W.G. **The development of measurement and analysis system to accurately determine asphalt concrete properties using the indirect tensile mode.** *Proceedings of the Association of Asphalt Technologists*, v. 61, p 304-332, 1992.

SAAL, R.N.; PELL, P.S. **Fatigue of bituminous road mixes.** *Kolloid-Zeitschrift*. 1960. 171 p.

SEED, H.B.; CHAN, C.K.; LEE, C.E. **Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failure in asphalt pavement.** *Proceedings – International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*. University of Michigan, Ann Arbor, 1962. p. 611-636.

SILVA, S.A.T.; HOLANDA, A.S. Uso de elementos finitos na análise de pavimentos flexíveis. *In: AMOSTRA CIENTÍFICA DE PESQUISAS DA ENGENHARIA CIVIL*, 5, 2011. Fortaleza, 2011.

SOARES, J. B.; MATEOS, A; MOTTA, L. M. G. Aspectos gerais de métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos de vários países e a relação com um novo método brasileiro. **Revista Pavimentação**, v. XVII, 2010.

SOARES, J.B.; SOUZA, F.V. Verificação do Comportamento Viscoelástico Linear em Misturas Asfálticas. *In: 16º ENCONTRO DO ASFALTO - IBP*, 2002, Rio de Janeiro. **Anais...** 16º Encontro do Asfalto - IBP , Rio de Janeiro, 2002.

SOARES, J.B.; SOUZA, F.V. Considerações sobre Módulo Resiliente e Módulo Dinâmico em Misturas Asfálticas com Base na Teoria da Viscoelasticidade. *In: XII CONGRESSO IBERO-LATINOAMERICANO DO ASFALTO*, 2003, Quito. **Anais...** XII Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto, Quito, 2003.

SOUZA, F.V.; SOARES, J.B. **Previsão do comportamento mecânico de misturas asfálticas a partir dos resultados do ensaio de creep estático.** *In: CNT/ANPET (Org.)/LGE (Ed.). Transporte em transformação VII – Trabalhos vencedores do Prêmio CNT Produção Acadêmica 2002*, Brasília, 2002.

THEISEN, K.M.; CERATTI, J.A.P.; AL-QADI, I.L. Uma discussão sobre a adoção do Coeficiente de Poisson como parâmetro constitutivo de misturas asfálticas. *In: 20º ENCONTRO DO ASFALTO*, 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** 20º Encontro do Asfalto - IBP. Rio de Janeiro, Editora da Petrobrás, 2010. v. 1.

THEISEN, K.M. **Estudo de parâmetros constitutivos extraídos de dados experimentais no comportamento de misturas asfálticas.** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

VON QUINTUS, H.L.; SCHEROCMAN, J.A.; HUGHES, C.S.; KENNEDY, T.W. **Asphalt-aggregate mixture analysis system AAMAS**. National Cooperative Highway Research Program Report, n. 338, Washington, D.C, 1991.

IPC GLOBAL. **UTS003: Indirect Tensile Modulus Test Software Reference**. Austrália: IPC Global, 2006. 28p.

WITZACK, M. W. **NCHRP Research Results Digest N° 285: Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design**. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2004.

WITZACK, M. W. **Harmonized test methods for laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design**. Project 1-28A, Final Report, Research Results Digest N° 285, University of Maryland, 2004. 48p.

**APÊNDICE A – TABELA COMPARATIVA DAS PRINCIPAIS NORMAS
NACIONAIS E INTERNACIONAIS PARA O ENSAIO DE MÓDULO DE
RESILIÊNCIA PARA MISTURAS ASFÁLTICAS**

Tabela A1: Recomendações para o ensaio de MR de misturas asfálticas das principais normas nacionais e internacionais

Norma/ Parâmetro	BSi DD 213 (1993)	DNER ME 133 (1994)	AS 2891.13.1 (1995)
Origem	Inglaterra	Brasil	Austrália
Tipo de carregamento	Equipamento deve gerar carregamento com formato de onda <i>haversine</i> ou similar	Pneumático	Hidráulico/ Pneumático
Frequência (Hz)	1	1	1
Ciclos de pré-condicionamento	- Deformação alvo → 0,005% do diâmetro da amostra - Após obtenção da deformação alvo → 5 ciclos	- 200 ciclos ou até a obtenção de registro mensurável no oscilógrafo - Carregamento máximo → 30% da RT	- Deformação alvo → 50±20 microstrain - Após obtenção da deformação alvo → 5 ciclos
Ciclos de condicionamento	5	500	10
Ciclos de cálculo	5	3 (p/ os ciclos: 300, 400 e 500)	5
Temperatura (°C)	20	30	25
Período de estabilização de temperatura	Espera-se a temperatura atingir o equilíbrio entre o centro e as bordas do CP (Tolerância: 0,4)	Não especifica	Espera-se a temperatura atingir o equilíbrio
Coef. de Poisson	Assumido (ν = 0,35)	Assumido (ν = 0,30)	Assumido (ν = 0,4)
Calculo do MR Total	Não	Não	Não
Cálculo do MR Instantâneo	Não	Sim	Sim

Tabela A1: Recomendações para o ensaio de MR de misturas asfálticas das principais normas nacionais e internacionais (continuação)

Norma/ Parâmetro	ASTM D4123 (1995)	AASHTO TP-31 (1996)	prEN 12967-26 (2003)
Origem	Estados Unidos	Estados Unidos	Europa
Tipo de carregamento	Hidráulico/ Pneumático	Hidráulico/ Pneumático	Equipamento deve gerar carregamento com formato de onda <i>haversine</i> ou similar
Frequência (Hz)	0,33, 0,5 e 1	1	2
Ciclos de pré-condicionamento	- Entre 50 e 200 - Critério de início de ensaio → Deformação de 0,0025mm	-Ensaio a 5°C (Entre 50 e 150) -Ensaio a 25°C (Entre 50 e 100) -Ensaio a 40°C (Entre 20 e 50)	-Pelo menos 10 - Equipamento deve ajustar o carregamento e a deformação mínima para o ensaio
Ciclos de condicionamento	Não especifica	30 (mínimo)	5
Ciclos de cálculo	Mínimo de 3	Utiliza-se 4 dos 5 últimos ciclos	5
Temperatura (°C)	5, 25, 40	5, 25, 40	2, 10, 20
Período de estabilização de temperatura	24 h (mínimo)	24 h (mínimo)	Espera-se a temperatura atingir o equilíbrio entre o centro e as bordas do CP (Tolerância: 0,4)
Coef. de Poisson	Determinado/ Assumido ($\nu = 0,35$)	Determinado	Determinado/ Assumido ($\nu = 0,35$)
Cálculo do MR Total	Sim	Sim	Não
Cálculo do MR Instantâneo	Sim	Sim	Não

Tabela A1: Recomendações para o ensaio de MR de misturas asfálticas das principais normas nacionais e internacionais (continuação)

Norma/ Parâmetro	DNIT ME 135 (2010)	ABNT NBR 16018 (2011)
Origem	Brasil	Brasil
Tipo de carregamento	Pneumático	Hidráulico/ Pneumático
Frequência (Hz)	Não especifica	1
Ciclos de pré-condicionamento	Não especifica	-50 ciclos - Carregamento máximo → 10 a 20% da RT
Ciclos de condicionamento	Não especifica	15
Ciclos de cálculo	Não especifica	15 (dividos em 3 grupos de 5)
Temperatura (°C)	25	25
Período de estabilização de temperatura	Não especifica	4 h (mínimo)
Coef. de Poisson	Assumido ($\nu = 0,30$)	Determinado/ Assumido ($\nu = 0,30$)
Cálculo do MR Total	Não	Sim
Cálculo do MR Instantâneo	Sim	Sim

**APÊNDICE B – PRINCÍPIOS DO FUNCIONAMENTO E METODOLOGIA DO
TRATAMENTO DE DADOS DO EQUIPAMENTO UNIVERSAL TESTING
MACHINE (UTM-25) DA IPC GLOBAL PARA O ENSAIO DE MR PARA
MISTURAS ASFÁLTICAS**

A UTM-25, produzida pela empresa australiana IPC Global, é um equipamento que, baseado na capacidade de aplicação de um carregamento hidráulico, é capaz de realizar diversos tipos de ensaio, para diferentes tipos de materiais, como: metais, fibras, plásticos, embalagens, além dos materiais utilizados comumente em pavimentação. No que concerne aos estudos de materiais utilizados para pavimentação, o equipamento é capaz de realizar ensaios de MR para misturas asfálticas e solos, MD, fadiga e *creep*.

O equipamento é constituído de três partes distintas, representadas na Figura B1. Estas partes são: (a) unidade geradora de carregamento hidráulico (*Hydraulic Power Supply*), capaz de gerar carregamentos estáticos de $\pm 25\text{KN}$ e carregamentos dinâmicos de $\pm 20\text{KN}$, em frequências de até 70Hz, (b) câmara de controle do ambiente de ensaio (*environmental chamber*), para controle de temperatura de ensaios realizados a temperaturas diferentes da ambiente e (c) unidade para controle e aquisição de dados, denominado Sistema de Controle de Multi-eixos Integrado (*Integrated Multi-Axis Control System, IMACS*).

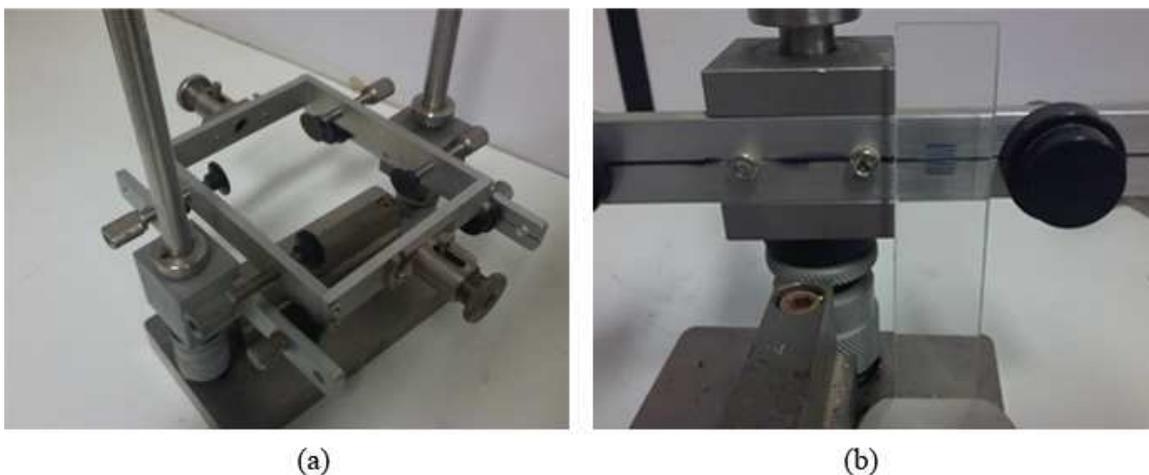
Figura B1: Equipamentos da UTM-25 da IPC Global - Adaptado do panfleto comercial da empresa



O IMACS trabalha como padrão de fábrica com oito canais de recebimento de dados (expansíveis até 32) e dois eixos de controle (expansíveis até oito). A programação dos ensaios e o tratamento de dados é realizada pelo pacote de *software* desenvolvido pela própria empresa, o UTS.

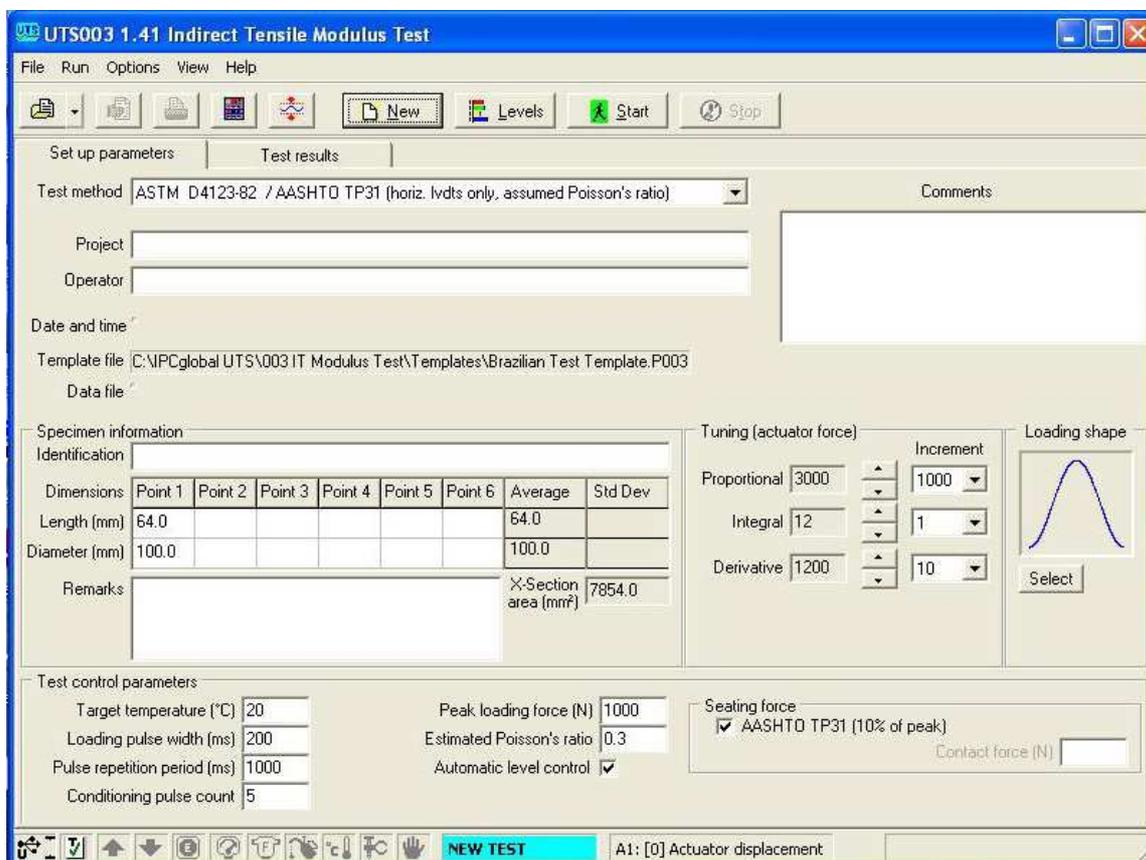
Para a realização do ensaio de MR para misturas asfálticas com a utilização de LVTDs apenas na horizontal, a empresa disponibiliza o aparato necessário para montagem do ensaio (Figura B2a). Para assegurar o correto posicionamento durante ensaio de um CP com 100mm de diâmetro e garantir a horizontalidade das leituras realizadas pelos LVTDs, um gabarito de montagem é disponibilizado (Figura B2b).

Figura B2: Aparato para montagem do CP durante o ensaio de MR



O programa utilizado para a realização do ensaio de MR para misturas asfálticas é o UTS003, sua interface está representada na Figura B3. Os dados de entrada para a realização do ensaio são: temperatura de ensaio ($^{\circ}\text{C}$), duração do pulso de carregamento (ms), duração total de um ciclo de ensaio (ms), quantidade de pulsos computados no cálculo do MR, força de carregamento (N) e o valor de coeficiente de Poisson. Quanto ao carregamento, é possível a seleção do formato da onda de carregamento hidráulico aplicado (*haversine*, triangular ou formato representativo de um carregamento pneumático). Quando o equipamento está conectado a um compressor externo, também há a opção de aplicação de um carregamento pneumático real.

Figura B3: Interface do programa UTS003 para o ensaio de MR para misturas asfálticas na UTM-25

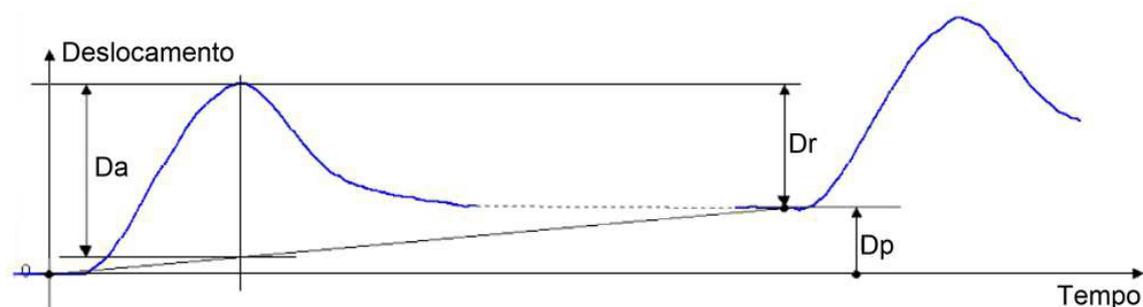


No *software* é possível selecionar a metodologia com a qual o teste vai ser realizado, as opções são: (i) AS 2891.13.1 (1995) – Austrália, (ii) BSi DD213 (1996) – Inglaterra, (iii) EN 12697-26 (2004) – Europa, (iv) ASTM D4123 (1982) – EUA e (v) AASHTO TP-31 (1994) – EUA. Porém, o manual (IPC GLOBAL, 2006) do programa salienta que os valores de MR instantâneo, deformações recuperáveis e determinação do coeficiente de Poisson, recomendados pelas normativas americanas não são medidos nem determinados pelo programa.

A sessão 4.3 do manual do programa (IPC GLOBAL, 2006) discute a metodologia de obtenção e tratamento dos dados obtidos durante o ensaio de MR. Na Figura B4 está ilustrada a curva de deslocamento obtida a partir da realização de um ensaio de MR para misturas asfálticas realizado na UTM-25, discriminando os deslocamentos “Da” (que

representa a amplitude de deslocamento total), “Dr” (deslocamento resiliente) e “Dp” (deslocamento não-recuperável da amostra).

Figura B4: Curva de deslocamento de um ensaio de MR em misturas asfálticas – Adaptado de IPC GLOBAL (2006)



Pode-se observar através da Figura B4, que a metodologia para obtenção do deslocamento resiliente (Dr) adotada no programa é diferente da recomendada pela normas AASHTO TP-31 (1996) e ASTM D4231 (1982), as quais são apontadas como referências para a realização do ensaio, sendo possível inclusive a seleção dessas metodologias como base para o procedimento de ensaio e tratamento dos dados na interface do programa. O procedimento para obtenção do deslocamento resiliente está ilustrado na Figura 18, na seção 3.5 deste trabalho.

Na definição de “Da” que consta no manual (IPC GLOBAL, 2006) há a indicação de que esse deslocamento é utilizado apenas na metodologia britânica (BSi DD213, 1996), para o cálculo do chamado Módulo de Rigidez (*Stiffness Modulus*). Porém, existe contradição no texto, pois na mesma seção onde são exibidas as equações utilizadas para o processamento dos dados, “Da” aparece como o deslocamento utilizado para o cálculo do MR para as metodologias norte-americanas (Figura B5).

Pode-se observar também na Figura B5, que constam apenas as equações para o cálculo do MR total com coeficiente de Poisson determinado (1) ou assumido (2). Não constam no manual as equações para o cálculo do MR instantâneo, que utilizam a deformação resiliente.

Figura B5: Equações utilizadas para processamento dos dados no programa UTS003 –
Adaptado de IPC GLOBAL (2006)

US Test Methods Calculations (ASTM D 4123, AASHTO TP31)

Total Resilient Poisson's Ratio for standard transducer setup

$$VRT = 3.59 \times Drh / Drv - 0.27$$

(1) Total Resilient Modulus with calculated Poisson ratio. Note that the total resilient Poisson's ratio value is restricted by the software to $0.1 < VRT < 0.5$

$$E = 1000 \times Fp \times (VRT + 0.27) / h \times Da$$

(2) Total Resilient Modulus with constant Poisson ratio.

$$E = 1000 \times Fp \times (v + 0.27) / h \times Da$$

Permanent deformation per pulse

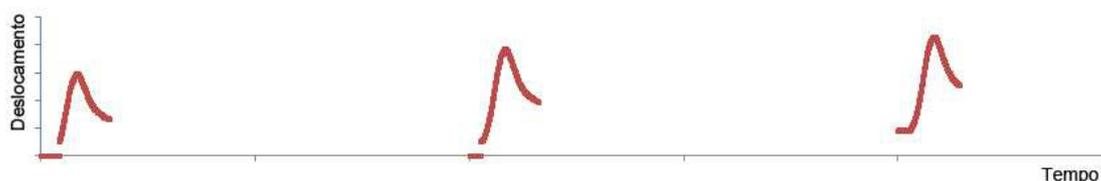
$$Dp/Pulse = [Dp(n) + Dp(n-1) + Dp(n-2) + Dp(n-3) + Dp(n-4)] / 5$$

Total Resilient Poisson's Ratio for TP9 transducer setup

$$VRT = -0.10 + 1.480 \times \text{sqr}(Drh / Drv) - 0.778 \times \text{sqr}(h / d) \times \text{sqr}(Drh / Drt)$$

O programa UTS003 permite que se exporte os dados de ensaio em um arquivo do Excel, de forma a permitir ao usuário a possibilidade de se fazer um pós-processamento dos dados. Porém, os dados da porção de recuperação da curva de deslocamento não são salvos pelo programa (Figura B6), impedindo o futuro processamento dos dados de acordo com as recomendações das normas mais utilizadas usualmente. Como para obtenção do deslocamento resiliente, utilizado no cálculo do MR instantâneo, é necessário que se faça uma regressão hiperbólica da porção de recuperação da curva de deslocamento, não é possível a obtenção deste a partir do processamento dos dados exportados pelo programa UTS003.

Figura B6: Curva de deslocamento de um ensaio de MR realizado na UTM-25



Pode-se concluir então que o programa nativo da UTM-25 para a obtenção do MR para misturas asfálticas, o UTS003, não está preparado para a obtenção do MR instantâneo

(ou resiliente) diretamente, nem gera informações suficientes para o pós-processamento dos dados. Essa problemática pode levar a erros na caracterização dos materiais, visto que os usuários são levados a crer que os dados de saída de MR gerados pelo programa representam o MR instantâneo, enquanto estes representam o MR total.