

**AVALIAÇÃO E ANÁLISE PARAMÉTRICA DO ENSAIO DE
COMPRESSÃO DIAMETRAL SOB CARGAS REPETIDAS EM
MISTURAS ASFÁLTICAS**

Porto Alegre
Março 2006

LÉLIO ANTÔNIO TEIXEIRA BRITO

**AVALIAÇÃO E ANÁLISE PARAMÉTRICA DO ENSAIO DE
COMPRESSÃO DIAMETRAL SOB CARGAS REPETIDAS EM
MISTURAS ASFÁLTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia na modalidade Acadêmico

Porto Alegre
Março de 2006

B862a Brito, Lélío Antônio Teixeira

Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas / Lélío Antônio Teixeira Brito. – 2006.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2006.

Orientador : Prof. Dr. Jorge Augusto Pereira Ceratti

1. Pavimentos. 2. Mistura Asfáltica – Ensaio. 3. Módulo de resiliência. I. Ceratti, Jorge Augusto Pereira, orient. II. Título.

CDU-625.85(043)

LÉLIO ANTÔNIO TEIXEIRA BRITO

**AVALIAÇÃO E ANÁLISE PARAMÉTRICA DO ENSAIO DE
COMPRESSÃO DIAMETRAL SOB CARGAS REPETIDAS EM
MISTURAS ASFÁLTICAS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 29 de março de 2006

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti
D.Sc. pela COPPE – UFRJ
Orientador

Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Profa. Laura Maria Goretti da Motta
(COPPE -UFRJ)
D.Sc. pela COPPE – UFRJ

Profa. Liédi Légi Bariani Bernucci
(EPUSP)
Dra. pela EPUSP

Prof. Glauco Tulio Pessa Fabbri
(EESC - USP)
Dr. Pela EESC - USP

Prof. Washington Peres Núñez
(UFRGS)
Dr. pela UFRGS

Good things come to those who wait

*Dedico este trabalho aos meus pais, Lélío e Celina por
todo o amor e ensinamentos e à eterna paixão da minha
vida, Ângela, minha razão de existir.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria primeiramente de agradecer a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho. São muitos anos que se passaram no mundo dos livros; alguns 20 anos de muitas aulas e ensinamentos, professores e colegas que merecem meus mais profundos agradecimentos por todo o conhecimento e sabedoria doados. Estendo este apreço, agradecendo a algumas pessoas em especial.

Ao Prof. Jorge A. P. Ceratti, orientador desta dissertação, que não só me apoiou neste trabalho sem medir esforços para sua realização, norteando o seu rumo, mas que também me proporcionou o ingresso na vida acadêmica mostrando toda sua potencialidade e o sentido de ser um pesquisador.

Ao Prof. Washington P. Núñez pelo conhecimento e tempo dedicado, sempre impulsionando e motivando os alunos, dando-lhes fôlego nas horas mais difíceis. Incontáveis foram as vezes que em mim depositou confiança, acreditando no meu potencial de pesquisador.

Ao Professor Luciano Specht, da UNIJUÍ, pelo exemplo de motivação pela pesquisa e trabalho em equipe. Sempre aberto a discussões, mostrou-me as bases da pavimentação asfáltica, motivando a busca do aperfeiçoamento de todos os trabalhos desenvolvidos.

À Professora Liédi Bernucci, coordenadora do Laboratório de Tecnologia de Pavimentos da EPUSP, e ao Eng. Edson Moura pela ajuda na condução desta pesquisa através da moldagem dos corpos-de-prova e das valiosas discussões e contribuições a este trabalho.

Aos pesquisadores do LCPC, Nantes, em especial ao Mr. Brosseaud e a Mme. La Roche, por viabilizarem minha visita e também pelas contribuições feitas a este estudo. Estendo meus agradecimentos ao Mr. Travers e Mr. Bouron, e, não poderia faltar, Mr. Kerzreho e Mr. Gouy, que fariam qualquer pessoa desejar trabalhar no setor de simulação de tráfego do LCPC.

A todos da equipe do LAPAV, um time dos sonhos, em especial à Bernadete, Vinícius e Seu Ivo por todos estes anos de convivência, sempre com um sorriso, uma palavra e um gesto para amenizar os duros dias de trabalho.

Ao time da pavimentação: Daniel Vitorino, Fernando Albuquerque, Klaus Theisen, Luciana Rohde e também ao meu grande amigo Thiago Vitorello. A todos faltam palavras para descrever o apoio e todo o conhecimento transmitido. Ao Klaus, em especial por compartilhar desta dissertação ativamente, discutindo dia a dia as soluções adotadas. Ao Daniel, que muito me ajudou na fase

experimental, dando todo o apoio possível. Ao Thiago por além das grandes doses de ensinamento, por termos compartilhado nosso ingresso nesta área, convivendo sempre com palavras de motivação, coleguismo e muita amizade.

Em especial também, deixo meus agradecimentos mais sinceros ao Eduardo Borba (*in memoriam*). Sem dúvidas deixou saudades; a pavimentação rodoviária definitivamente perdeu um dos grandes potenciais; ele que já era um grande engenheiro, mas certamente seria ainda maior. Obrigado por ser um grande amigo e por deixar o exemplo de um profissional irretocável.

Ao Ivan Ribas, meu grande companheiro de módulo, que muito me ensinou sobre a vida dentro de um laboratório, dedicando todo seu tempo à transmissão de seus conhecimentos e que indiscutivelmente ajudou a aprimorar o sistema desenvolvido.

Ao amigo Dionísio Doering, da empresa DBI, pelo excelente trabalho desenvolvido na concepção do sistema de aquisição. Foram meses neste projeto de muita paciência e aprimoramentos.

À Delmac, notadamente ao Gabriel De Leon, pela ajuda na concepção das peças e pelos serviços de usinagem executados, todos realizados com excelência de qualidade.

Ao Eng. Armando Morilha da Greca asfaltos pelo fornecimento dos ligantes para a pesquisa.

A todos os professores do PPGEC pela qualidade dos ensinamentos, e também a todos os funcionários. Agradeço ainda a todos os colegas, que citando nomes, duplicaria este volume.

À Capes pelo auxílio que possibilitou dedicação à pesquisa.

Agradeço em especial ao meu pai Lélío, minha mãe Celina e minha irmã Letícia, que foram sempre minha fonte de vitalidade que, apesar de todas as barreiras que a vida impôs, em qualquer momento hesitaram na doação do amor, carinho, amizade e conhecimento, entendendo as ausências e as retornando com motivação incondicional.

Por último, o mais importante dos agradecimentos, ao eterno amor da minha vida, minha alma gêmea, Ângela Graeff. Não apenas me ajudou em absolutamente todas as etapas, mas, sobretudo, na finalização deste trabalho. Mostrou-me exemplos da beleza da vida, do amor ao trabalho e à pesquisa. Entendeu minha ausência e minha distância, com apoio e carinho. Construiu a base, a estrutura e ainda concluiu com beleza o nosso início. Obrigado por tudo e te amo para sempre muito mais.

RESUMO

BRITO, L.A.T. Avaliação e Análise Paramétrica do Ensaio de Compressão Diametral sob Cargas Repetidas em Misturas Asfálticas. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O módulo de resiliência (MR) é hoje um dos parâmetros-chave para o dimensionamento empírico-mecanístico de pavimentos flexíveis. Há, entretanto, algumas peculiaridades no ensaio de tração indireta com cargas cíclicas que ocasionam variações na sua determinação. A investigação de tais fatores é necessária para que a magnitude do seu efeito sobre o valor de MR seja quantificada. Para isto, esta pesquisa avaliou, através de uma análise paramétrica, os algoritmos apresentados pelo Protocolo P07 do LTPP, análogo ao método correntemente utilizado pelas instituições brasileiras de pesquisa em pavimentação, e pela pesquisa NCHRP 1-28/1-28A para determinação dos deslocamentos resilientes, bem como o efeito do pulso e frequência de carregamento e níveis de tensão de tração (%RT) em duas misturas asfálticas: uma mistura com ligante asfáltico convencional e outra com ligante asfáltico modificado por adição de borracha. Foram necessárias adaptações no equipamento de compressão diametral cíclica utilizado na pesquisa, e também a montagem de um sistema de posicionamento de sensores que permitisse a gravação de deslocamentos horizontais e verticais viabilizando a determinação do coeficiente de Poisson. Realizaram-se ensaios de MR e resistência à tração (RT) às temperaturas de 10°, 25° e 35°C e, complementarmente, ensaio de fadiga (tensão controlada) a 25°C. Os resultados obtidos demonstram a alta sensibilidade do valor de MR aos algoritmos de cálculo dos deslocamentos resilientes; o algoritmo apresentado pela pesquisa 1-28/ 1-28A do NCHRP foi considerado adequado. Observou-se a dependência do MR ao pulso de carga, à frequência de ensaio e também ao nível de tensão aplicado durante o ensaio. A magnitude desta dependência, entretanto, é função do tipo de mistura e da temperatura sob a qual o ensaio foi realizado. A determinação do coeficiente de Poisson pareceu ser bastante suscetível ao sistema de medição utilizado, tendo apresentando uma grande variabilidade. Nos ensaios de vida de fadiga sob tensão controlada pode-se evidenciar a redução dos valores de MR dentro da zona de condicionamento. Propõe-se ainda que a defasagem medida entre o pulso de carga e o pulso de deslocamento no ensaio de MR, possa ser usada como indicador do comportamento visco-elástico das misturas, uma vez que apresentou comportamento análogo ao do ângulo de fase.

Palavras-chave: pavimentos; misturas asfáltica; módulo de resiliência; coeficiente de Poisson.

ABSTRACT

BRITO, L.A.T. Avaliação e Análise Paramétrica do Ensaio de Compressão Diametral sob Cargas Repetidas em Misturas Asfálticas. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Resilient Modulus (RM) has been a key-parameter for empirical-mechanistic flexible pavement design. However, there are some particularities in the repetitive loading indirect tension test (IDT) which leads to some variability on its determination. Such factors need investigation in order to quantify their effect on RM value. Thus, this research evaluated, through a parametric analysis, the algorithm presented by the P07 LTPP Protocol, analogous to the method currently used by the Brazilian pavement research institutes, and the NCHRP 1-28/1-28A Project for resilient deformation calculations, as well as the effect of load pulse time and frequency and the tensile stress levels during test (%TS) in two different asphalt mixes: one with conventional asphalt binder and the other with asphalt-rubber binder. In order to follow international standards procedures the cyclical IDT machine had to be adapted, Besides, a positioning system for displacement transducers, which allowed to measure both vertical and horizontal deformation, was assembled in order to determine Poisson's ratio. MR and IDT testing were performed at 10°, 25° and 35°C and, complementarily, fatigue testing (controlled stress mode) at 25°C. The results demonstrated the high sensibility of the RM value to the algorithms for resilient deformation calculation; the algorithm proposed by the NCHRP 1-28/1-28A was considered adequate. RM value is detected as dependent to the load pulse, test frequency and also to the stress level during test. The dependency level is, however, related to the mix type and the testing temperature. Poisson ration determination seemed to be very sensitive to the used measurement system, presenting very high variability in the tests performed. In the fatigue tests under controlled stress modes it was detected a reduction of MR values inside the conditioning zone. It is also proposed that the delay between load pulse time and deformation pulse time may be used as an indicator of mix viscoelastic behavior, once that it has showed similar trend to the phase angle.

Key-words: pavements; asphalt mix; resilient modulus; Poisson's ratio

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| LISTA DE FIGURAS | xi |
| LISTA DE TABELAS | xiv |
| LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS..... | xvi |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA..... | 3 |
| 1.2 OBJETIVO GERAL..... | 5 |
| 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 5 |
| 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 6 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 7 |
| 2.1 DEFORMABILIDADE DOS PAVIMENTOS..... | 7 |
| 2.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL | 11 |
| 2.3 MÓDULOS DINÂMICOS..... | 16 |
| 2.3.1 Módulo de resiliência | 18 |
| 2.3.1.1 Princípio do ensaio | 21 |
| 2.3.1.2 Equacionamento do cálculo do módulo de resiliência | 23 |
| 2.3.1.3 Sensibilidade do módulo de resiliência | 30 |
| 2.3.2 Módulo complexo..... | 52 |
| 2.4 NORMAS DE ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DE MR..... | 55 |
| 2.4.1 Norma norte-americana ASTM D-4123..... | 56 |
| 2.4.2 Norma norte-americana AASHTO TP-31-96 | 57 |
| 2.4.3 Protocolo LTPP P07 | 58 |
| 2.4.4 Pesquisa 1-28A do NCHRP..... | 59 |
| 2.4.5 Norma europeia NF EN 12697-26 / 2004 | 60 |
| 2.4.6 Norma australiana AS 2891.13.1..... | 62 |
| 2.4.7 Norma DNER 133/94 | 63 |
| 3. EQUIPAMENTO, MÉTODOS E MATERIAIS UTILIZADOS | 64 |
| 3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL..... | 64 |
| 3.1.1 Efeitos e níveis avaliados | 64 |
| 3.1.2 Matriz experimental..... | 68 |
| 3.2 EQUIPAMENTO UTILIZADO..... | 70 |
| 3.2.1 Pórtico de carregamento | 73 |

| | |
|--|-----|
| 3.2.2 Sistema de posicionamento dos LVDTs..... | 76 |
| 3.2.3 Calibração do pulso de carga..... | 78 |
| 3.2.4 Determinação do tempo de atraso do equipamento utilizado..... | 80 |
| 3.2.5 Sensores de deslocamento | 82 |
| 3.3 MÉTODOS EMPREGADOS..... | 83 |
| 3.3.1 Ensaio de módulo de resiliência | 83 |
| 3.3.2 Correção do abaulamento | 89 |
| 3.3.3 Ensaio de resistência à tração | 93 |
| 3.3.4 Ensaio de fadiga | 94 |
| 3.4 MATERIAIS USADOS NA PESQUISA..... | 94 |
| 3.4.1 Cimento asfáltico | 95 |
| 3.4.2 Agregados minerais | 96 |
| 3.4.3 Mistura utilizada e confecção dos corpos-de-prova | 97 |
| 3.4.4 Resina Epóxi..... | 99 |
| 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 100 |
| 4.1 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO | 100 |
| 4.2 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE POISSON..... | 106 |
| 4.3 ANÁLISE PARAMÉTRICA DO ENSAIO DE MR | 113 |
| 4.3.1 Variação do MR em função do tempo de pulso de carga..... | 114 |
| 4.3.1 Variação do MR em função da frequência de carregamento | 122 |
| 4.3.3 Variação do MR em função da carga aplicada durante o ensaio..... | 123 |
| 4.3.4 Variação do MR em função da forma do pulso de carga | 125 |
| 4.4 VIDA DE FADIGA..... | 127 |
| 4.5 DEFASAGEM ENTRE PULSO DE CARGA E DESLOCAMENTO..... | 130 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 133 |
| 5.1 CONCLUSÕES | 133 |
| 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 137 |
| ANEXO A | 145 |
| ANEXO B..... | 150 |
| ANEXO C..... | 156 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 – Deformações sob cargas repetidas | 2 |
| Figura 2.1 – Ensaios para análise de deformabilidade em misturas asfálticas | 9 |
| Figura 2.2 – Estados de tensões típicos em uma camada de concreto asfáltico submetido à uma carga de roda | 10 |
| Figura 2.3 – Esquema de carregamento e plano de ruptura típica no ensaio de RT..... | 11 |
| Figura 2.4 – Distribuição teórica de tensões nos planos diametrais para o ensaio de tração indireta. (Solução proposta por Frocht, para uma carga concentrada) | 12 |
| Figura 2.5 – Notação para componentes polares de tensão em um elemento circular comprimido..... | 14 |
| Figura 2.6 – Esquema do equipamento para ensaio de MR por compressão diametral | 22 |
| Figura 2.7 – Esquema do carregamento do corpo-de-prova no ensaio de MR | 22 |
| Figura 2.8 – Pulso de carga e deslocamento típicos em um ensaio de MR..... | 23 |
| Figura 2.9 – Consideração de m,n nas equações apresentadas por Zhang | 28 |
| Figura 2.10 – Forma de pulso de carga de semi-seno-verso e triangular | 32 |
| Figura 2.11 – Tempo de carga variável com a profundidade | 32 |
| Figura 2.12 – Onda de carregamento do tipo semi-seno-verso usada nos ensaios de MR..... | 33 |
| Figura 2.13 – Pulso de tensão em pavimento ensaiado pelo Simulador UFRGS – DAER/RS..... | 33 |
| Figura 2.14 – Pulso de tensão vertical sob pulso de carga triangular e senoidal..... | 34 |
| Figura 2.15 – Pulso de tensão vertical sob pulso de carga triangular em estrutura analisada por Medina e Motta (1995)..... | 35 |
| Figura 2.16 – Efeito do tempo de elevação da carga no pulso na rigidez. | 37 |
| Figura 2.17 – Forma do pulso de carga preconizado pela proposta de norma BSI DD213:1993 | 37 |
| Figura 2.18 – Evolução do MRi e MRt em função do número de ciclos aplicado..... | 41 |
| Figura 2.19 – Sensibilidade do valor do MR ao coeficiente de Poisson | 41 |
| Figura 2.20 – Ilustração esquemática das componentes de deslocamento resiliente | 43 |
| Figura 2.21 – Deslocamentos totais e deslocamentos resilientes instantâneos e totais..... | 44 |
| Figura 2.22 – Esquema de algoritmos para determinação dos deslocamentos resilientes | 45 |
| Figura 2.23 – Abaulamento não uniforme em corpos-de-prova sob tração indireta | 47 |
| Figura 2.24 – Variação de uma regressão linear em função do ruído associado à medida. | 51 |
| Figura 2.25 – Gráfico tensão <i>versus</i> deformação no ensaio de módulo complexo | 52 |
| Figura 2.26 – Tipos de curvas utilizadas para representação do módulo complexo | 54 |
| Figura 3.1 – Forma dos pulsos de carga usados nos ensaios com período de carregamento de $0,2s$ | 67 |
| Figura 3.2 – Equipamento de ensaio de MR para misturas asfálticas do LAPAV/UFRGS..... | 71 |
| Figura 3.3 – Programa de Controle do ensaio de MR e detalhes das telas de configurações | 72 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.4 – Comparação entre os sinais de deslocamento obtido no sistema novo e no antigo | 72 |
| Figura 3.5 – Perda de carga por atrito no pórtico de carregamento | 74 |
| Figura 3.6 – Sistema de Posicionamento de LVDT – POLI/USP adaptado. | 75 |
| Figura 3.7 – Pórtico de carregamento utilizado nesta pesquisa..... | 75 |
| Figura 3.8 – Exemplo de posicionamento de sensores..... | 76 |
| Figura 3.9 – Estado de tensões em corpos-de-prova cilíndricos durante o ensaio de MR | 77 |
| Figura 3.10 – Sistema de posicionamento de LVDTs concebido para a pesquisa | 78 |
| Figura 3.11 – Volume de ar mobilizado <i>versus</i> período do pulso de carga. | 80 |
| Figura 3.12 – Pulso de carga usado nos ensaios de MR com duração de 0,1s..... | 80 |
| Figura 3.13 – CP calibração NAT (a) e CP calibração SEEPAV (b)..... | 81 |
| Figura 3.14 – Sensores de deslocamento usados na pesquisa | 82 |
| Figura 3.15 – Seqüência de montagem do ensaio de MR | 85 |
| Figura 3.16 – Nomenclatura utilizada pela pesquisa 1-28/1-28A do NCHRP..... | 86 |
| Figura 3.17 – Períodos de análise preconizados pelo Protocolo P07 em um pulso de deslocamento horizontal medido com sensor preso externamente ao corpo-de-prova | 86 |
| Figura 3.18 – Períodos de análise preconizados pelo Protocolo P07 em um pulso de deslocamento horizontal medidos com sensores presos na face do corpo-de-prova..... | 87 |
| Figura 3.19 – Modelo de elemento finito utilizado na análise de MEF para correção do abaulamento 90 | |
| Figura 3.20 – Prensa para ensaio de RT por tração indireta instrumentada | 93 |
| Figura 3.21 – Distribuição granulométrica dos agregados minerais utilizados no estudo | 97 |
| Figura 3.22 – Composição granulométrica das misturas asfálticas utilizadas na pesquisa..... | 98 |
| Figura 4.1 – Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento em um ensaio de RT a 10°C | 102 |
| Figura 4.2 – Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento em um ensaio de RT a 25°C | 103 |
| Figura 4.3 – Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento em um ensaio de RT a 35°C | 103 |
| Figura 4.4 – Gráfico tensão-deformação de um ensaio de RT a 35°C (CP1A)..... | 105 |
| Figura 4.5 – “v” calculado segundo Protocolo P07 – sem correção do efeito de abaulamento | 107 |
| Figura 4.6 – “v” calculado segundo Protocolo P07 –efeito de abaulamento corrigido | 107 |
| Figura 4.7 – “v” instantâneo calculado segundo a Pesquisa 1-28/1-28A – sem correção do efeito de abaulamento | 109 |
| Figura 4.8 – “v” total calculado segundo a Pesquisa 1-28/1-28A – sem correção do efeito de abaulamento | 109 |
| Figura 4.9 – “v” instantâneo calculado segundo a Pesquisa 1-28/1-28A – efeito de abaulamento corrigido | 110 |
| Figura 4.10 – “v” total calculado segundo a Pesquisa 1-28/1-28A – efeito de abaulamento corrigido | 110 |
| Figura 4.11– MR_{iP07} em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos horizontais (CA-AB)..... | 115 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.12 – MR_{i-28} MRT_{1-28} em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos horizontais (CA-AB) | 115 |
| Figura 4.13 – $MR_{i_{p07}}$ em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos verticais (CA-AB) | 116 |
| Figura 4.14 – MR_{i-28} MRT_{1-28} em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos verticais (CA-AB)..... | 116 |
| Figura 4.15 – $MR_{i_{p07}}$ em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos horizontais (CA-C)..... | 117 |
| Figura 4.16 – MR_{i-28} MRT_{1-28} em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos horizontais (CA-C) | 117 |
| Figura 4.17 – $MR_{i_{p07}}$ em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos verticais (CA-C)..... | 118 |
| Figura 4.18 – MR_{i-28} MRT_{1-28} em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos verticais (CA-C)..... | 118 |
| Figura 4.19 – Pulsos de deslocamento dos três tempos de pulsos de carga estudados | 121 |
| Figura 4.20– MRT_{1-28} em função da frequência de ensaio na mistura de CA-AB (a) e CA-C (b)..... | 122 |
| Figura 4.21 – MRT_{1-28} MR_{i-28} em função do tempo do percentual de RT utilizado no ensaio (CA-AB) | 123 |
| Figura 4.22 – MRT_{1-28} MR_{i-28} em função do tempo do percentual de RT utilizado no ensaio (CA-C)..... | 124 |
| Figura 4.23 – MRT_{1-28} MR_{i-28} em função do tempo da forma do pulso de carga usada no ensaio (CA-AB)..... | 126 |
| Figura 4.24 – MRT_{1-28} MR_{i-28} em função do tempo da forma do pulso de carga usada no ensaio (CA-C) | 126 |
| Figura 4.25 – Modelos de Fadiga em função da diferença de tensões e da tensão de trabalho..... | 128 |
| Figura 4.26 – Evolução do MRT_{1-28} em função do número de ciclos (20%RT aplicado) | 129 |
| Figura 4.27 – Redução da rigidez ao longo da vida de fadiga | 130 |
| Figura 4.28 – Representação da defasagem medida entre pulso de carga e deslocamento | 131 |
| Figura 4.29 – Ângulos de defasagem apresentados nos ensaios de MR | 131 |
| (a) CA-AB e (b) CA-C | 131 |
| Figura 4.30 – Ângulo de defasagem determinado no ensaio de MR para a mistura CA-AB..... | 132 |
| Figura 4.31 – Ângulo de defasagem determinado no ensaio de MR para a mistura CA-C | 132 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 2.1 – Equações para cálculo das propriedades de tração em corpos-de-prova cilíndricos sob carregamento distribuído com relação $a/2R=1/8$ e $a/2R=1/12$ | 25 |
| Tabela 2.2 – Valores das Constantes $I_{1,2,3,4}$ para equações 2.21 à 2.24 para $a/2R=1/8$ | 28 |
| Tabela 2.3 – Tempos usados pela AASHTO e LTPP para determinação dos deslocamentos resilientes instantâneos | 46 |
| Tabela 3.1 – Matriz de experimentos realizados na pesquisa | 69 |
| Tabela 3.2 – Curso dos LVDTs utilizados em função dos estágios de ganho..... | 82 |
| Tabela 3.3 – Resultado das análises realizadas para determinação da correção por abaulamento..... | 91 |
| Tabela 3.4 – Coeficientes para correção dos deslocamentos pelo efeito de abaulamento | 92 |
| Tabela 3.5 – Propriedades do CAP 20 utilizado na pesquisa | 95 |
| Tabela 3.6 – Propriedades do Ecoflex B utilizado na pesquisa..... | 95 |
| Tabela 3.7 – Características da Brita 1 e Pedrisco | 96 |
| Tabela 3.8 – Características do Pó de pedra..... | 96 |
| Tabela 3.9 – Valores médios das análises granulométricas dos agregados..... | 97 |
| Tabela 3.10 – Resumo das características volumétricas das misturas utilizadas na pesquisa..... | 98 |
| Tabela 3.11 – Classificação dos grupos de CPs segundo o volume de vazios..... | 99 |
| Tabela 4.1 – Resultados de RT das misturas estudadas | 101 |
| Tabela 4.2 – Deslocamentos horizontais mobilizados até a ruptura no ensaio de RT (mm)..... | 104 |
| Tabela 4.3 – Área dos gráficos tensão <i>versus</i> deformação (MPa). | 105 |
| Tabela 4.4 – Valores médios de v obtidos para $MR@35,25,10^{\circ}C$ (1Hz;0,10;15%)..... | 108 |
| Tabela 4.5 – Resumo dos coeficientes de Poisson total e instantâneos obtidos para $MR@25$ (1Hz;0,10) calculados segundo a pesquisa 1-28/1-28A..... | 111 |
| Tabela 4.6 – ANOVA realizada para os resultados de MR em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos horizontais (CA-AB)..... | 116 |
| Tabela 4.7 – ANOVA realizada para os resultados de MR em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos verticais (CA-AB)..... | 117 |
| Tabela 4.8 – ANOVA realizada para os resultados de MR em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos horizontais (CA-C)..... | 118 |
| Tabela 4.9 – ANOVA realizada para os resultados de MR em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos verticais (CA-C)..... | 119 |
| Tabela 4.10 – Percentuais médios utilizados para correção dos deslocamentos devido ao efeito de abaulamento | 120 |
| Tabela 4.11 – ANOVA realizada para os resultados de MR em função da frequência de ensaio na mistura de CA-AB..... | 122 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 4.12 – ANOVA realizada para os resultados de MRT_{1-28} MRI_{1-28} em função do percentual de RT utilizado no ensaio (CA-AB)..... | 124 |
| Tabela 4.13 – ANOVA realizada para os resultados de MRT_{1-28} MRI_{1-28} em função do percentual de RT utilizado no ensaio (CA-C) | 124 |
| Tabela 4.14 – ANOVA realizada para os resultados de MRT_{1-28} MRI_{1-28} em função da forma do pulso de carga usada no ensaio (CA-AB) | 126 |
| Tabela 4.15 – ANOVA realizada para os resultados de MRT_{1-28} MRI_{1-28} em função da forma do pulso de carga usada no ensaio (CA-C)..... | 127 |

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

AC: corrente alternada

AS: Australian Standard

ASTM: American Society for Testing and Materials

a: largura da seção carregada (largura dos frisos de carregamento)

BSI: British Standards Institution

COPPE/UFRJ: Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia da UFRJ

d: diâmetro do corpo-de-prova

DAER: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul

DC: corrente direta

DR: taxa de deformação $\frac{Y_T}{X_T}$ (coeficiente angular da reta de melhor ajuste entre a deformação vertical Y_T e a deformação horizontal correspondente X_T até a carga de ruptura P_{rup})

Δ : deslocamento elástico total

Δ_{corr} : correção do deslocamento horizontal / vertical

Δ_R : deslocamento resiliente total

Δ_{R1} : parcela 1 do deslocamento resiliente

Δ_{R2} : parcela 2 do deslocamento resiliente

E: módulo de elasticidade

E_1 : parte real do módulo complexo

E_2 : parte imaginária do módulo complexo

E^* : módulo complexo

$|E^*|$: módulo de rigidez

$E(t)$: módulo secante

EN: European Standard

EPUSP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

EUA: Estados Unidos da América

EVR: Elemento de Volume Representativo

ε_r : deformação axial recuperável

ε_t : deformação de tração

ε_x : deformação específica num ponto distante “x” do centro do corpo-de-prova

ε_{xx} : deformação no eixo x

ε_{yy} : deformação no eixo y

FHWA: Federal Highway Administration

FWD: Falling Weight Deflectometer

ϕ : ângulo de defasagem

G: módulo de cisalhamento

ISC: Índice de Suporte Califórnia

K: módulo de compressibilidade

l: comprimento sobre o qual a deformação é estimada

LTPP: Long-Term Pavement Performance

LVDT: Linear Variable Displacement Transducer

MR: módulo de resiliência

MR_{iP07} : Módulo Resiliente Instantâneo calculado a partir do algoritmo proposto pelo Protocolo P07 em função do deslocamento resiliente instantâneo

MR_{i1-28} : Módulo Resiliente Instantâneo calculado a partir do algoritmo proposto pela pesquisa NCHRP 1-28/1-28A em função do deslocamento resiliente instantâneo

MR_{t1-28} : Módulo Resiliente Total calculado a partir do algoritmo proposto pela pesquisa NCHRP 1-28/1-28A em função do deslocamento resiliente total

μm : micrômetro (1×10^{-3} mm)

NCHRP: National Cooperative Highway Research Program

Nf: Vida de fadiga

ν : coeficiente de Poisson

p: carga aplicada expressa como pressão

P: carga total aplicada

P_{cicl} : carga cíclica aplicada

P_{rup} : carga total máxima aplicada

pts: pontos

θ : deslocamento angular de um ponto ao eixo y

r: distância radial do ponto à origem

R: raio do elemento circular

R' : coeficiente angular da linha de melhor ajuste entre a deformação vertical Y e a deformação horizontal X correspondente

RT: resistência à tração

s: segundo

SGC: Superpave Gyrotory Compactor

SHRP: Strategic Highway Research Program

Ssv: semi-seno-verso (haversine)

S_h : módulo tangente horizontal $\frac{P}{X_T}$ (coeficiente angular da linha de melhor ajuste entre a carga P e a deformação horizontal total X_T para cargas até a carga de ruptura)

σ_c : tensão de compressão no centro do corpo-de-prova

σ_d : tensão axial desviadora cíclica

σ_r : tensão normal radial

σ_{rx} : tensão normal radial em um ponto situado no eixo OX

σ_{ry} : tensão normal radial em um ponto situado no eixo OY

σ_x : tensão normal no eixo x

σ_{xx} : tensão no eixo x

σ_y : tensão normal no eixo y

σ_{yy} : tensão no eixo y

σ_t : tensão de tração

σ_θ : tensão normal tangencial

$\sigma_{\theta x}$: tensão normal tangencial em um ponto situado no eixo OX

$\sigma_{\theta y}$: tensão normal tangencial em um ponto situado no eixo OY

t: espessura do corpo-de-prova

TRB: Transportation Research Board

$\tau_{r\theta}$: tensão cisalhante em um ponto situado a r, θ

UFRJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

X: deformação horizontal total a uma dada carga

X_T : deformação horizontal total (m)

x,y: valores das coordenadas a partir do centro do corpo-de-prova

2α : ângulo radial do friso

1. INTRODUÇÃO

As rodovias representam para o país uma importante fração de seu patrimônio. São estruturas de grande escala que possibilitam o transporte de bens e os mais diversos acessos ao homem. Do ponto de vista técnico, requerem grande conhecimento para sua concepção, projeto, execução e manutenção. Assim, inúmeras são as pesquisas que buscam melhorar seu desempenho, tendo em vista sua importância e custo.

O estudo de metodologias para dimensionamento de pavimentos é, sem dúvidas, um destes grandes focos de pesquisa na comunidade científica rodoviária, que segue na procura de meios para otimizá-las. Dentre elas, inúmeras são aquelas voltadas às camadas de revestimento, que possuem forte influência no desempenho dos pavimentos e que são responsáveis pela maior parte do aporte financeiro investido.

Nos últimos anos, tem-se evoluído de metodologias puramente empíricas para processos empírico-mecanísticos de dimensionamento de pavimentos rodoviários, os quais são, além de mais racionais, significativamente mais complexos e que conduzem a melhores resultados. Para tais análises, é indispensável um excelente conhecimento dos parâmetros de entrada para que os resultados sejam adequados.

Neste sentido, o estudo do módulo de resiliência (MR), considerado parâmetro-chave para o conhecimento do comportamento tensão-deformação de materiais para pavimentação, é um dos requisitos mais importantes. Ele é recomendado por vários procedimentos de dimensionamento de pavimentos como sendo o parâmetro utilizado na análise mecânica e na avaliação estrutural das camadas de pavimentos flexíveis. Um dos mais difundidos é o guia de projeto de pavimentos da AASHTO de 1993, correntemente adotado, na íntegra ou como referência-base, por vários outros métodos teórico-experimentais para projeto de pavimentos, e que contempla somente resultados de MR para avaliação de misturas asfálticas. Também nos Estados Unidos da América, o Órgão Federal de Administração de Rodovias (FHWA) o adotou como parâmetro primário de desempenho para projeto de pavimentos.

No Brasil, o módulo de resiliência foi determinado primeiramente através de ensaios triaxiais de cargas repetidas em solos pela COPPE/UFRJ em 1977 (Medina e Motta, 2005). As

primeiras pesquisas com materiais asfálticos também foram desenvolvidas na COPPE/UFRJ, (Pinto e Preussler, 1980). Atualmente, estes ensaios são difundidos e utilizados no país no meio acadêmico e profissional, nas investigações do comportamento mecânico de materiais de pavimentação.

No estudo de materiais pela mecânica clássica, define-se como módulo de elasticidade, ou módulo de Young, a relação proporcional entre as tensões e deformações dos materiais quando no limite elástico-linear. O MR é análogo ao módulo de Young, porém, enquanto o segundo é determinado sob carregamento monotônico e sob pequenos deslocamentos, o primeiro é determinado sob a ação de cargas cíclicas, o que procura simular o tipo de sollicitação a que o pavimento é submetido em campo quando da passagem de um veículo.

Sabe-se que muitos dos materiais empregados na pavimentação não apresentam comportamento elástico, pois sofrem deformações plásticas em cada aplicação de carga, por menores que sejam. Entretanto, se a carga aplicada for pequena em relação à resistência do material e for repetida por um grande número de vezes, a deformação em cada carregamento é quase completamente recuperável (e proporcional à carga) e pode, portanto, ser considerada elástica (Huang, 2004).

A Figura 1.1 mostra a deformação de um corpo-de-prova sob carregamento cíclico. Nota-se que há um considerável acúmulo de deformações plásticas no estágio inicial. Com o aumento do número de repetições, esta deformação plástica tende a estabilizar, de forma que, após 100 a 200 repetições, as deformações são praticamente todas recuperáveis - elásticas.

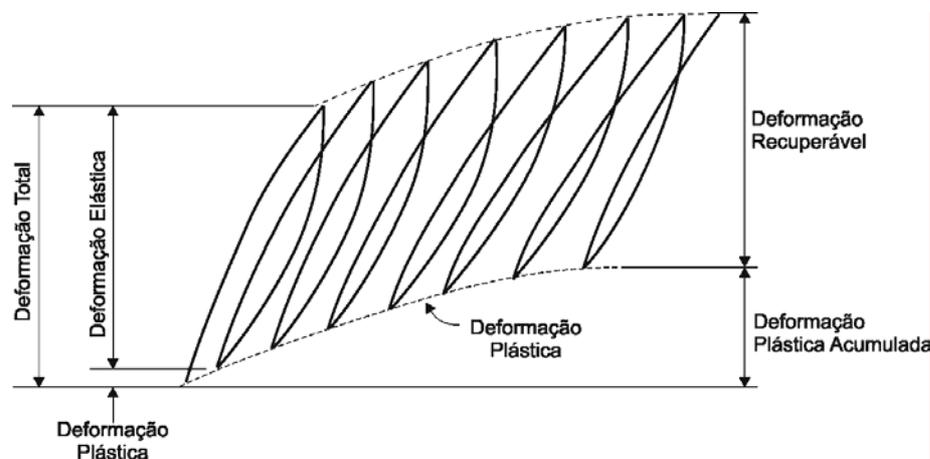


Figura 1.1 – Deformações sob cargas repetidas

Fonte: Huang (2004)

O módulo de elasticidade baseado na deformação recuperável sob carregamento cíclico é chamado de módulo de resiliência – MR, definido pela equação 1.1.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (1.1)$$

Onde:

σ_d = tensão axial desviadora cíclica

ε_r = deformação axial recuperável

Este ensaio pode ser conduzido em todos os tipos de materiais de uso em pavimentação, dos coesivos aos estabilizados. Entretanto, as condições de ensaio (estado de tensões, por exemplo) afetam a resposta do MR dos diferentes materiais de diferentes formas (Yoder, 1975).

O ensaio difundido no Brasil para determinação do módulo de resiliência em misturas asfálticas é o ensaio de tração indireta por compressão diametral sob carregamento cíclico, normalizado pelo DNER, atualmente DNIT, através da norma DNER-ME 133/94.

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

O módulo de resiliência (MR) é definido como um importante parâmetro no estudo dos materiais de pavimentação desde o início da segunda metade do século passado. Contudo, as normas atuais, nacionais e internacionais para este ensaio, não são suficientemente específicas de forma a produzir resultados consistentes e reprodutivos. Diferenças nos equipamentos de teste, instrumentação, preparação dos corpos-de-prova, condições finais dos corpos-de-prova, e processamento de dados aparentemente tem considerável efeito no valor do MR obtido a partir do ensaio.

Muitos foram os estudos feitos na intenção de padronizar as várias metodologias de ensaio existentes, mas ainda não há um consenso sobre qual a metodologia, ou fusão delas, a adotar. A pesquisa 1-28 do NCHRP¹ - *Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible*

¹ O NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*) foi estabelecido em 1962 para promover pesquisas contínuas em rodovias. É administrado pelo TRB e patrocinado pela AASHTO em cooperação com FHWA.

Pavement Design - concluída em 1997 e desenvolvida pelo Instituto de Tecnologia da Geórgia (EUA) em parceria com North Carolina State University (EUA) fez grandes avanços neste sentido, propondo novos métodos de ensaio na forma de procedimentos da AASHTO.

A Pesquisa 1-28A do NCHRP – *Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavements*, dando continuidade a estes esforços, foi conduzida de 1998 a 2003 pelo College Park da Maryland University (EUA) com o intuito de harmonizar as proposições feitas pela pesquisa NCHRP 1-28, implementada sob método de ensaio AASHTO TP-31, para misturas asfálticas e TP-46, T-292, e T-294 para materiais granulares, com aquelas feitas pelo FHWA LTPP² *Laboratory Start-Up and Quality Control Procedure*(FHWA-RD-96-176).

Vários trabalhos têm avaliado o ensaio de MR de misturas asfálticas por tração indireta nos últimos anos; na literatura internacional destacam-se os trabalhos de Heinicke *et al.* (1988), Brown *et al.* (1989), Witczak (1989), Al-Sugair *et al.* (1992), Roque *et al.* (1992), Fonseca (1996), Zhang *et al.* (1997), Li *et al.* (1999), Widyatmoko (2002) e Durham *et al.* (2002); no país, destacam-se os trabalhos de Preussler (1983), Pinto (1991), Motta (1991), Medina *et al.* (1995), Vianna (2002), Falcão *et al.* (2002), Loureiro (2003), Moura (2004) e Marques (2004).

Embora outras tantas pesquisas, congressos e simpósios tenham sido dedicados à mesma problemática: homogeneizar o procedimento de ensaio e/ou melhor interpretar o MR, ainda há necessidade de um grande esforço na busca desta padronização. Isto se deve, em grande parte, à constante modernização dos sistemas mecânicos, eletrônicos e dos recursos computacionais para automação e aquisição de dados. Por viabilizarem testes cada vez mais minuciosos, precisos e confiáveis, há uma demanda de novos padrões, na grande maioria das vezes com notáveis diferenças daquelas impostas há uma década atrás.

Adicionalmente, modelos para prever o desempenho de pavimentos em serviço, tanto das condições estruturais quanto funcionais, estão sendo pesquisados (Ullidtz, 1987; Rodrigues, 1991; DNER, 1998b; Hicks e Epps, 1999). Sendo o MR um dos fundamentais parâmetros

² O LTPP (*Long-Term Pavement Performance Program*) é um programa de estudos de 20 anos, iniciado em 1987, que monitora pavimentos em serviço, abrangendo mais de 2400 seções experimentais de pavimentos asfálticos e de concreto de cimento portland nos EUA e Canadá. É Administrado pelo FHWA e faz parte do SHRP.

para muitos modelos de previsão de desempenho de pavimentos asfálticos, fica evidente que a sua determinação seja a mais precisa possível.

1.2 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa buscou avaliar o ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral em misturas asfálticas, através de uma análise paramétrica, no intuito de melhor compreender os efeitos das variáveis do ensaio, viabilizando, assim, sugestões para uniformizar a sistemática de ensaio.

Procurou-se durante o curso da pesquisa buscar respostas para as seguintes questões propostas quando do início dos trabalhos: Quais as variáveis experimentais que influenciam na determinação do módulo de resiliência em misturas asfálticas? Como isolá-las? Como reduzir a variabilidade deste ensaio?

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desta pesquisa foram os seguintes:

- a) Adaptar o equipamento de ensaio de módulo de resiliência à compressão diametral para misturas asfálticas do Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da UFRGS aos padrões de normas internacionais deste ensaio.
- b) Variar o pulso de carregamento cíclico, quanto à forma e frequência, no ensaio de módulo de resiliência à compressão diametral para misturas asfálticas.
- c) Verificar o efeito da magnitude de carga no valor do módulo de resiliência de misturas asfálticas.
- d) Estudar os efeitos citados em (b) e (c) em duas misturas asfálticas: concreto asfáltico usinado a quente (CA) e concreto asfáltico com ligante modificado por adição de borracha de pneu, verificando tais comportamentos às temperaturas de 10°C, 25°C e 35°C.
- e) Determinar o coeficiente de Poisson das misturas estudadas nas três temperaturas citadas.

f) Verificar a comportamento do módulo de resiliência durante a evolução da vida de fadiga no ensaio de fadiga à tensão controlada.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente pesquisa foi estruturada em cinco capítulos. O capítulo 1 apresentou o tema da pesquisa, sua relevância, uma breve definição do conceito-chave envolvido neste estudo – MR – e seus objetivos.

O capítulo 2 se constitui de uma revisão da bibliografia existente acerca do tema da pesquisa. Apresentam-se os tipos de ensaio de carregamento cíclico para caracterização das misturas asfálticas, os conceitos teóricos envolvidos no cálculo do MR, uma delimitação dos possíveis fatores de influência na sua determinação e as normas em vigor.

O capítulo 3 apresenta os métodos utilizados na realização dos ensaios, uma descrição do equipamento montado para os testes e do software de controle utilizado, além da descrição dos materiais empregados.

No capítulo 4, são mostrados os resultados da matriz experimental ensaiada, bem como uma análise estatística dos resultados, para melhor definir as respostas observadas.

Com o capítulo 5, buscou-se documentar as conclusões da pesquisa e também fazer algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem a finalidade de abordar os assuntos mais relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa. Inicialmente, disserta-se sobre o princípio da deformabilidade dos materiais asfálticos, para que se entenda a base teórica na qual se inclui o estudo do módulo de resiliência (MR), foco deste trabalho.

Logo após, é mostrado o ensaio de compressão diametral por ser o fundamento mecânico tanto do ensaio de MR quanto do ensaio de resistência à tração, e a seguir, discutem-se os procedimentos de teste mais conhecidos para avaliação da rigidez de misturas asfálticas: Módulo Complexo, Módulo Elástico e Módulo de Rigidez à Flexão (Gonzalez, 1975; Fonseca, 1996).

Também é feito um relato das correlações existentes para determinação empírica do MR e das normas e procedimentos de ensaio mais conhecidos, buscando evidenciar a divergência entre as diferentes recomendações.

2.1 DEFORMABILIDADE DOS PAVIMENTOS

O primeiro estudo sistemático da deformabilidade dos pavimentos deve-se a Francis Hveem (1955). Foi ele quem introduziu o conceito de resiliência. Ele preferiu utilizar este termo, ao invés de deformação elástica, sob o argumento de que as deformações nos pavimentos são muito maiores do que nos sólidos elásticos com que lida o engenheiro – concreto, aço, etc (Medina e Motta 2005).

Define-se, assim, resiliência como sendo a capacidade de um material absorver energia quando deformado elasticamente e então, após o descarregamento, ter a sua energia recuperada.

O conceito de módulo de resiliência, por sua vez, só foi apresentado em 1962 por Seed *et al.*, segundo Gonzalez *et al.* (1975). E de acordo com Wallace (1980), o ensaio de MR por compressão diametral para misturas tratadas com asfalto foi desenvolvido em detalhe por Schmidt (1972). O usam baseado na medição dos deslocamentos horizontais (deslocamentos de extensão) gerados por um carregamento de compressão vertical em corpos-de-prova

cilíndricos. Por isto é também conhecido como ensaio de módulo de resiliência sob tração indireta.

Os métodos de ensaio de laboratório para determinação do MR foram inicialmente desenvolvidos tanto para concretos asfálticos quanto para agregados e solos. Surgiram da necessidade de se avaliar os materiais quanto a sua deformabilidade para que se pudessem viabilizar análises de camadas lineares, nas quais o módulo de elasticidade E e o coeficiente de Poisson ν são as principais propriedades dos materiais, tratados nestes modelos como materiais elástico-lineares.

Ainda que o comportamento das camadas asfálticas seja reconhecidamente ser não-linear, heterogêneo, anisotrópico e com comportamento visco-elasto-plástico, análises de camadas elástico-lineares são geralmente aceitas como sendo estimativas razoáveis da resposta de concretos asfálticos, dentro de certos limites de temperatura e carga.

Medina e Motta (2005) citam que a aplicação da teoria da elasticidade a misturas asfálticas só é admissível a níveis baixos de tensão de tração (40% ou menos) em relação à de ruptura e a temperaturas inferiores a 40°C. Pinto *et al.* (1981) consideram que estes limites são de tensões de tração da ordem de 50% ou menos em relação à resistência à tração do material e sob temperaturas inferiores a 35°C, enquanto Roque e Buttlar (1992) consideram que a carga e a temperatura limite sob as quais a resposta do material torna-se não-linear são difíceis de serem determinadas.

Na Figura 2.1 são mostrados alguns tipos de ensaios de laboratório usados na determinação de propriedades das misturas asfálticas quanto à sua deformabilidade. Cada um deles oferece vantagens e desvantagens; isto é associado ao nível de dificuldade na obtenção do corpo-de-prova, na complexidade de operação e custo dos equipamentos, na confiabilidade e repetibilidade dos resultados e no seu princípio de funcionamento.

A Figura 2.1, que foi adaptada dos trabalhos de Capitão (2003) e Di Benedetto (2004), mostra desenhos esquemáticos dos princípios de cada ensaio. O primeiro autor faz referência aos ensaios usados na avaliação da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas, enquanto o segundo autor faz uma revisão dos ensaios para determinação de módulo complexo nestas misturas, tópico abordado no item 2.3.2 deste trabalho.

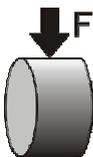
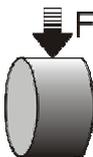
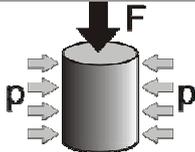
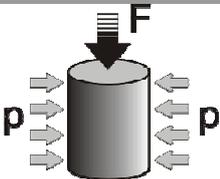
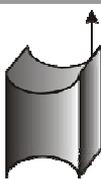
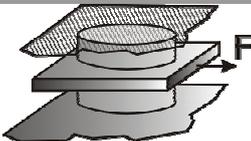
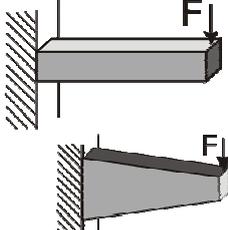
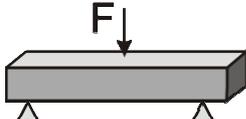
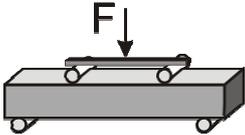
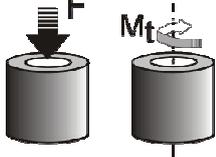
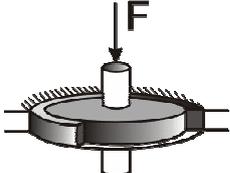
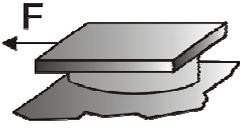
| | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| (a) Ensaio de Compressão Uniaxial Estática | (b) Ensaio de Compressão Uniaxial com Aplicação de Cargas Repetidas | (c) Ensaio de Tração Direta |
|  |  |  |
| (d) Tração Indireta Estática | (e) Tração Indireta com Aplicação de Cargas Repetidas | (f) Compressão Triaxial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

Figura 2.1 – Ensaio para análise de deformabilidade em misturas asfálticas [Capitão (2003) e Di Benedetto (2004)]

³ LCPC (*Laboratoire Central de Ponts et Chaussées*) –Laboratório de Pesquisas de Trabalhos Públicos Francês.

Dos ensaios apresentados, o ensaio de tração indireta (Figura 2.1 ‘d’ e ‘e’) é amplamente difundido no estudo de materiais para pavimentação. O ensaio de tração indireta estático é utilizado para determinação da resistência à tração (RT) dos materiais, enquanto o ensaio de tração indireta com carregamento cíclico é usado para determinação do MR destes materiais. Uma das razões para tanto, é que a localização crítica para fissuração induzida por carregamento em um pavimento flexível é considerada como sendo na face inferior da camada do revestimento asfáltico imediatamente abaixo da carga de roda, onde o estado de tensões é de tração longitudinal e transversal combinado com compressão vertical, tal como ocorre no ensaio de tração indireta.

A Figura 2.2 ilustra as tensões induzidas por uma carga de roda em uma camada típica de concreto asfáltico. Estas podem ser divididas em quatro casos gerais:

1. Compressão triaxial na superfície e imediatamente abaixo da roda.
2. Tração longitudinal combinada com compressão vertical na base da camada de concreto asfáltico e imediatamente abaixo da carga.
3. Tração longitudinal ou transversal na superfície a alguma distância da carga.
4. Compressão longitudinal ou transversal na base da camada de concreto asfáltico a alguma distância da carga.

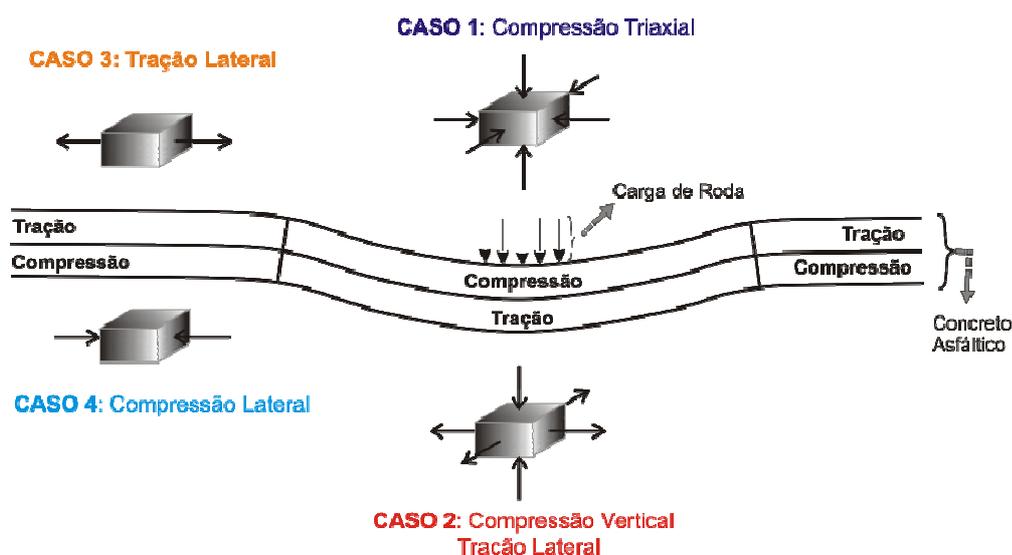


Figura 2.2 – Estados de tensões típicos em uma camada de concreto asfáltico submetido à uma carga de roda.

Fonte: Roque e Buttlar (1992)

2.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de compressão diametral foi desenvolvido por Carneiro (1943) para a determinação da resistência à tração (RT) de corpos-de-prova cilíndricos de concreto de cimento Portland; por ter sido desenvolvido no Brasil, ficou conhecido mundialmente como sendo “ensaio brasileiro”. Cabe salientar, que o mesmo ensaio também foi desenvolvido independentemente no Japão, por Akazawa.

Specht (2004) relata que este ensaio tem sido estudado e utilizado em diversas partes do mundo, principalmente pela sua simplicidade, baixo custo e adequada representação do estado de tensões que acontece em campo (Read e Collop, 1997; Brown e Foo, 1989; Tangela *et al.*, 1990).

Este ensaio, normalizado pela NBR-7222 (1994) para corpos-de-prova cilíndricos de argamassa ou concreto, consiste da aplicação de um carregamento monotônico a um corpo-de-prova cilíndrico ao longo de dois frisos opostos, o que resulta em uma tensão de tração relativamente uniforme atuando perpendicularmente ao plano diametral carregado e ocasionando, assim, uma ruptura ao longo do plano solicitado. A Figura 2.3 ilustra esquematicamente o princípio de ensaio.

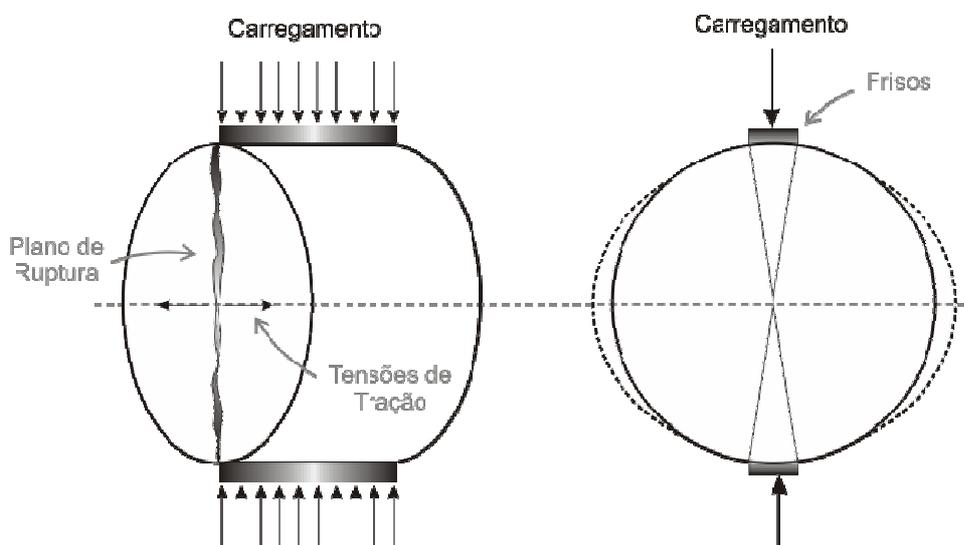


Figura 2.3 – Esquema de carregamento e plano de ruptura típica no ensaio de RT.

Segundo Zhang (1997), a solução teórica para a distribuição de tensões no interior de um disco comprimido por duas cargas diametralmente opostas foi primeiramente discutida por

Hertz (1883). Posteriormente, resultados similares foram apresentados por Michell (1900, 1902), Timoshenko (1934) e Wright (1955), com diferentes abordagens.

Em 1948, Frocht propôs a solução analítica para cálculo das tensões no interior de um corpo-de-prova circular sollicitado por uma carga concentrada. Esta solução é consagrada na bibliografia clássica de mecânica dos pavimentos e está apresentada na Figura 2.4.

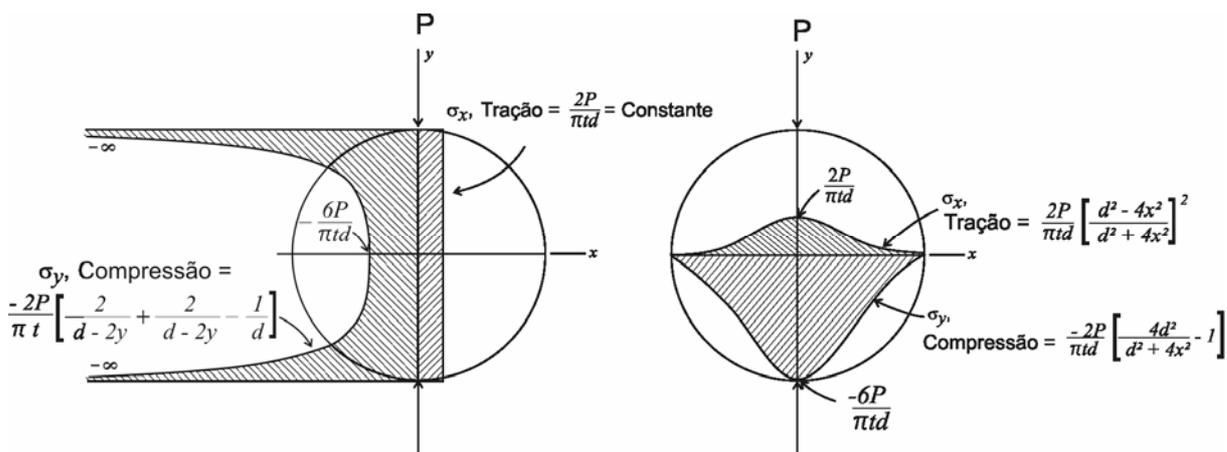


Figura 2.4 – Distribuição teórica de tensões nos planos diametrais para o ensaio de tração indireta. (Solução proposta por Frocht, para uma carga concentrada)

FONTE: Yoder (1975)

Onde:

σ_x = tensão normal no eixo x

σ_y = tensão normal no eixo y

P = carga total aplicada

t = espessura do corpo-de-prova

d = diâmetro do corpo-de-prova

x, y = valores das coordenadas a partir do centro do corpo-de-prova

Em 1959, Hondros, a partir de trabalhos já existentes de Wright (1955), Kajfasz e Pietrzykowski (1957), define as equações para determinação das tensões e deslocamentos no interior do corpo-de-prova considerando a carga distribuída por frisos de carregamento, viabilizando desta forma, o cálculo do coeficiente de Poisson e do módulo de elasticidade sob este tipo de carregamento. As tensões ao longo do eixo vertical e horizontal estão descritas nas Equações 2.1 a 2.6.

Tensões ao longo do diâmetro vertical (Eixo OY)

$$\sigma_{\theta y} = + \frac{2p}{\pi} \left[\frac{(1 - r^2/R^2) \text{sen } 2\alpha}{(1 - 2r^2/R^2 \cos 2\alpha + r^4/R^4)} - \tan^{-1} \left(\frac{1 + r^2/R^2}{1 - r^2/R^2} \right) \tan \alpha \right] \quad (2.1)$$

$$\sigma_{ry} = - \frac{2p}{\pi} \left[\frac{(1 - r^2/R^2) \text{sen } 2\alpha}{(1 - 2r^2/R^2 \cos 2\alpha + r^4/R^4)} + \tan^{-1} \left(\frac{1 + r^2/R^2}{1 - r^2/R^2} \right) \tan \alpha \right] \quad (2.2)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (2.3)$$

Tensões ao longo do diâmetro horizontal (Eixo OX)

$$\sigma_{\theta x} = - \frac{2p}{\pi} \left[\frac{(1 - r^2/R^2) \text{sen } 2\alpha}{(1 + 2r^2/R^2 \cos 2\alpha + r^4/R^4)} + \tan^{-1} \left(\frac{1 - r^2/R^2}{1 + r^2/R^2} \right) \tan \alpha \right] \quad (2.4)$$

$$\sigma_{rx} = + \frac{2p}{\pi} \left[\frac{(1 - r^2/R^2) \text{sen } 2\alpha}{(1 + 2r^2/R^2 \cos 2\alpha + r^4/R^4)} - \tan^{-1} \left(\frac{1 - r^2/R^2}{1 + r^2/R^2} \right) \tan \alpha \right] \quad (2.5)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (2.6)$$

Onde:

$\sigma_{\theta y}$ = tensão normal tangencial em um ponto situado no eixo OY

σ_{ry} = tensão normal radial em um ponto situado no eixo OY

$\tau_{r\theta}$ = tensão cisalhante em um ponto situado a r, θ

$\sigma_{\theta x}$ = tensão normal tangencial em um ponto situado no eixo OX

σ_{rx} = tensão normal radial em um ponto situado no eixo OX

$p = \frac{P}{at}$ = carga aplicada expressa como pressão

a = largura da seção carregada (largura dos frisos de carregamento)

Esta solução é válida tanto para o estado plano de tensões (discos) quanto para o estado plano de deformações (cilindros). A notação para componentes polares de tensão em um elemento circular comprimido utilizada nas equações 2.1 a 2.6 está apresentada na Figura 2.5.

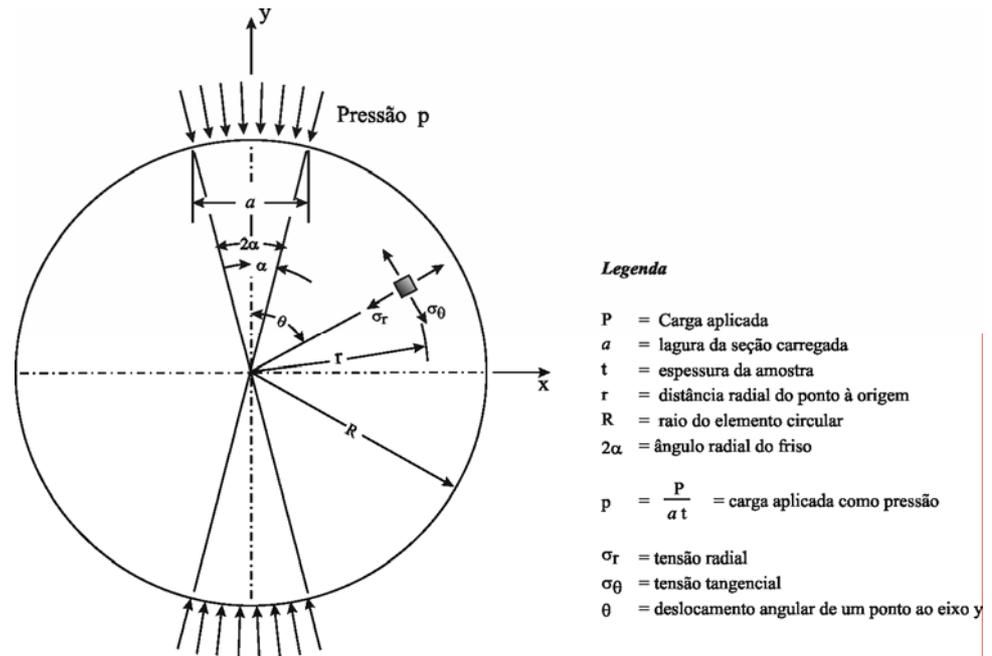


Figura 2.5 – Notação para componentes polares de tensão em um elemento circular comprimido.

Fonte: Hondros (1959)

As equações das tensões ao longo dos planos principais, correspondentes aos diâmetros horizontais e verticais, para uma largura de friso de carregamento “a” menor do que 2R/10, quando analisados no centro do corpo-de-prova podem ser reduzidos às Equações 2.7 e 2.8.

$$\sigma_{\theta y} = \sigma_{rx} = \frac{2P\alpha}{\pi a t} = \frac{2P}{\pi t d} (\text{tensão}) \quad (2.7)$$

$$\sigma_{\alpha x} = \sigma_{ry} = -\frac{6P\alpha}{\pi a t} = -\frac{6P}{\pi t d} (\text{compressão}) \quad (2.8)$$

Onde:

$$r/R = 0$$

$$\alpha = a/2R, \text{ aproximadamente}$$

Outros símbolos já definidos anteriormente

Neste caso, pode-se dizer que a Figura 2.4, cuja distribuição de tensões é para uma carga concentrada, também ilustra a distribuição de tensões ao longo dos eixos principais para uma

carga distribuída por um friso cuja largura seja menor do que $2R/10$. Neste momento a carga distribuída tende a uma carga concentrada dada a relação $a/2R$ ser muito pequena.

A relação obtida nos ensaios correntes, que utilizam corpos-de-prova de 101,6mm de diâmetro e friso de carregamento, 12,7mm, é de $a/2R$ igual a $1/8$. Neste caso o valor da resistência à tração pode ser calculado utilizando-se a equação 2.9 (simplificação das equações 2.1 e 2.5 para um ponto no centro do corpo-de-prova e valores de $a/2R > 1/10$).

$$\sigma_t = \frac{2P_{rup}}{\pi at} (\text{sen}2\alpha - \alpha) \quad (2.9)$$

Onde:

σ_t = tensão de tração

P_{rup} = carga de ruptura

Outros símbolos já definidos anteriormente

Entretanto, usualmente, o cálculo da resistência à tração é feito utilizando-se a equação 2.7 que, apesar de ser a solução para uma carga concentrada ou para carga distribuídas por frisos cuja largura seja menor do que 10% do diâmetro do corpo-de-prova, aproxima os valores para a configuração do ensaio corrente, normalizado pela ASTM D-4123 e DNER-ME 138/94, resultando em valores de resistência 2,13% superior à calculada pela equação 2.9.

Falcão e Soares (2002) apresentam uma pesquisa dedicada ao estudo de compressão diametral em materiais asfálticos. A pesquisa concentra-se na avaliação do efeito do friso de aplicação de carga no parâmetro da resistência à tração através da análise de resultados de ensaios realizados sob frisos confeccionados com diferentes larguras, em misturas asfálticas, solo-cimento e concreto-cimento. Em conclusão ao trabalho, verificaram a variação no valor da RT quando da presença dos diferentes frisos testados e da importância da consideração do componente viscoso em seus parâmetros de resistência. Também observaram que os pontos do cilindro 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, estar sendo afetada por este efeito.

Os mesmos autores apontam que já há estudos mostrando que a distribuição de tensões de tração-compressão gerado no ensaio de compressão diametral em concreto-cimento levaria a uma RT inferior àquela obtida diretamente (Newman & Newman, 1969). Luong (1990), entretanto, cita que alguns estudos apresentaram valores de resistência à tração obtidas indiretamente superiores em mais de 50% àquelas obtidas diretamente (Hawkes & Mellor, 1970; Wright, 1955).

Moura e Bernucci (2004) estudaram os deslocamentos verticais e horizontais em corpos-de-prova Marshall em ensaios de MR e RT. Com intenção de minimizar os efeitos de punção junto aos frisos de carregamento no ensaio de determinação da RT para que se obtivessem os deslocamentos verticais constantes ao longo de toda a superfície vertical, foi reduzida a velocidade de carregamento especificado pela norma DNER-ME-138-94 de 50mm/min para 1mm/min.

Foi verificado para as três misturas estudadas uma redução significativa da carga de ruptura quando da redução da velocidade de carregamento de 50 para 1mm/min, levando a uma redução média de 65% nos resultados de RT. Os valores dos deslocamentos horizontais apresentaram pequena redução, enquanto os verticais, significativa redução com o decréscimo da velocidade de carregamento para 1mm/min. Os autores atribuíram os efeitos observados ao tempo de relaxação por ação da componente viscoelástica das misturas asfálticas.

No mesmo trabalho, os autores relatam que, tanto nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral como também no ensaio de módulo de resiliência, evidenciou-se uma relação não-linear entre os deslocamentos verticais e horizontais. É, portanto, necessário a medição do coeficiente de Poisson durante os ensaios de MR, para que se reduza as possibilidades de erro na sua determinação em função da variação do coeficiente de Poisson com a carga aplicada.

2.3 MÓDULOS DINÂMICOS

O módulo de elasticidade é uma das propriedades mecânicas mais importantes para concretos asfálticos (CA), pois é relacionando aos parâmetros de resistência dos mesmos e, portanto à

resistência à ruptura dos pavimentos (Lytton *et al.* 1993 e Molenaar, 1982 *apud* Li 1999⁴). Fonseca e Witczak (1996) citam que o módulo de elasticidade tem forte influência na performance de uma estrutura de pavimento asfáltico. Em geral, este parâmetro é afetado por características das misturas, taxa de carregamento e condições ambientais locais; também constitui um importante requisito para análises mecânicas de sistemas de pavimentos flexíveis.

De um ponto de vista mecânico, quando um sistema de camadas elásticas é usado para projetar camadas asfálticas, o módulo de elasticidade é um parâmetro fundamental (Shell 1978). Portanto, o módulo de elasticidade de CA deve ser determinado durante a fase de projeto da mistura para melhor atender às necessidades de projeto do pavimento e sua melhor performance.

Para um comportamento isotrópico e linear-elástico, um material pode ser completamente caracterizado por duas constantes elásticas determinadas a partir de ensaios apropriados. Usualmente, nos projetos de pavimentos, o módulo de elasticidade **E** e coeficiente de Poisson **v** são as duas constantes avaliadas em laboratório e usadas na teoria de camadas.

Entretanto, como os tipos de solicitações a que os pavimentos estão sujeitos são solicitações dinâmicas e não estáticas, a simples análise do módulo de elasticidade sob carregamento estático, torna-se não representativa. Gonzalez *et al.* (1975) mostram em seu estudo que a relação entre o módulo de elasticidade medido sob carregamento dinâmico, no caso específico do seu estudo – módulo de elasticidade resiliente instantâneo, *versus* módulo de elasticidade estático pode variar de uma a onze vezes, com os valores do módulo de elasticidade estáticos sendo inferiores.

Adicionalmente, como os materiais asfálticos desenvolvem em seu comportamento tanto uma parcela de deformação elástica, quanto uma parcela viscoelástica, quando se aplicam carregamentos dinâmicos podem também ser avaliadas algumas propriedades tempo-dependentes. Desta forma, para que possa se conhecer a relação tensão-deformação ($\sigma \times \epsilon$) dos materiais asfálticos, utiliza-se, em regra, medições de módulos dinâmicos, a saber: módulo complexo, módulo de resiliência e módulo de rigidez à flexão, os quais são descritos a seguir nos itens 2.3.1 a 2.3.3.

⁴ LI, G.; LI, Y.; METCALF, J.B.; PANG, S. Elastic modulus prediction of asphalt concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 11, n. 3, p. 236-234, 1999.

Barksdale *et al.* (1997) citam que o módulo de compressibilidade (K) e módulo de cisalhamento (G) também são algumas vezes utilizados nas análises de camadas de pavimentos e que estas constantes K e G são mais fundamentais que E e ν , uma vez que são relacionadas à mudança de volume e distorção cisalhante, respectivamente. Como resultado, estas propriedades devem ser mais utilizadas no futuro para análise e projeto de pavimentos.

Cabe ainda salientar que o ensaio de módulo de resiliência e o ensaio de módulo complexo têm sido, de longe, os ensaios mais utilizados na determinação em laboratório das propriedades elásticas de materiais asfálticos. Há, entretanto, ensaios como o módulo de resiliência elástico – obtido a partir do ensaio de flexão alternada ou flexo-tração de cargas repetidas, usado pioneiramente no Brasil para determinação da vida de fadiga de solos estabilizados por Ceratti (1991) –, ensaio de cisalhamento simples, “*hollow cylinder*”, triaxial verdadeiro, coluna ressonante e outros, discutidos por Barksdale *et al.* (1997) para ensaios resilientes de materiais granulares.

Há ainda correlações empíricas e teóricas apresentadas na literatura para determinação do valor de módulo de concretos asfálticos. Os mais conhecidos são: correlação com a estabilidade-fluência Marshal, nomograma da Shell, nomograma de McLeod, e modelo do instituto do asfalto. Estes modelos e previsão estão detalhados em Marques (2004) e Barksdale *et al.* (1997).

2.3.1 Módulo de resiliência

O módulo de resiliência (MR) é análogo ao módulo de elasticidade (E) com ambos os termos tendo a mesma definição pela teoria da elasticidade, com a diferença que o MR é determinado a partir de um ensaio de cargas repetidas. Valores de pico de tensão e deformação recuperável (resiliente) no ensaio são usados para calcular as constantes elásticas resilientes, ainda que o pico de tensão e o pico de deformação recuperável não ocorram ao mesmo tempo em um ensaio dinâmico deste tipo (Barksdale *et al.*, 1997).

A determinação do MR de misturas asfálticas pode ser realizada utilizando-se vários tipos de ensaios de cargas repetidas. Os mais comumente utilizados são os seguintes:

- Ensaio de tração uniaxial

- Ensaio de compressão uniaxial
- Ensaio de viga à flexão
- Ensaio de tração por compressão diametral (tração indireta)
- Ensaio de compressão triaxial

As camadas de pavimentos apresentam efeito anisotrópico cruzado. As propriedades radiais são constantes em todas as direções, mas são diferentes das propriedades apresentadas na direção vertical. Wallace e Monismith (1980) salientam que para uma adequada descrição das propriedades resilientes de um material, os cinco parâmetros a seguir são necessários:

- i. Deformação vertical devido a um incremento na tensão vertical
- ii. Deformação radial devido a um incremento na tensão vertical
- iii. Deformação radial devido a um incremento na tensão radial
- iv. Deformação vertical devido a um incremento na tensão radial
- v. Deformação radial devido a um incremento na tensão radial em uma direção perpendicular à deformação

Eles relatam que os ensaios triaxiais medem o primeiro e algumas vezes o segundo parâmetro enquanto o ensaio diametral mede uma composição do terceiro com o quinto parâmetro com ponderação razoável entre eles. Devido a efeitos anisotrópicos do concreto asfáltico, a discrepância do MR entre ensaios diametraes e triaxiais pode ser bastante pronunciada.

Uma camada asfáltica de espessura típica está sujeita à flexão quando da ação de uma carga de roda. Esta ação é primeiramente resistida pela rigidez radial ao invés da rigidez vertical desta camada. Portanto, para corpos-de-prova verticais extraídas do pavimento, o ensaio diametral ou viga à flexão leva a avaliações mais representativas da rigidez da camada asfáltica.

Resultados de ensaios diametraes são, assim, particularmente atrativos para avaliação das deformações de tração radiais nas análises de fadiga. O ensaio diametral tem ainda vantagens adicionais; por utilizar corpos-de-prova delgados, permite avaliar diversas seções de um pavimento espesso (Wallace e Monismith, 1980).

Há, ainda, vários motivos para este ensaio ter sido considerado por muitos pesquisadores como um dos mais indicados à avaliação das características resilientes de misturas asfálticas. Entre eles, Gonzalez *et al.* (1975), Queiroz e Visser (1978), Preussler (1983), Barksdale *et al.* (1997) e Kim e Wen (2002) citam:

- a. É relativamente fácil de ser executado.
- b. O tipo de corpo-de-prova e o equipamento são os mesmos do ensaio de compressão.
- c. O corpo-de-prova pode ser obtido facilmente a partir do Compactador Giratório SuperpaveTM (SGC).
- d. Os corpos-de-prova no SGC simulam a relação entre a direção de compactação e direção da tensão de tração crítica do campo.
- e. A ruptura não é seriamente afetada pelas condições superficiais.
- f. A ruptura inicia-se em uma região de tensão de tração relativamente uniforme.
- g. O coeficiente de variação dos resultados do ensaio é baixo comparado com outros métodos.
- h. Pode ser feito com carga estática ou cargas repetidas.
- i. Pode fornecer informações sobre a resistência à tração, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, características de fadiga e de deformações permanentes.
- j. Simula o estado de tensão na parte inferior da camada asfáltica de um pavimento, que é uma zona de tração.

Adiciona-se a estes itens, o fato do corpo-de-prova ser moldado em equipamento utilizado na metodologia Marshall de dosagem de mistura asfálticas (corpo-de-prova cilíndrico de 101,6mm de diâmetro e 63,5mm de altura), amplamente difundida nos EUA durante a segunda metade do século XX e ainda utilizada em larga escala no Brasil e outros países, facilitando assim, a obtenção de corpos-de-prova para o ensaio. Outra grande vantagem é o de ser um ensaio não-destrutivo, permitindo que sejam determinadas outras propriedades do material após sua caracterização modular, como, por exemplo, teor de ligante, resistência à tração, desgaste, densidade, etc.

Kim e Wen (2002) chamam a atenção para algumas desvantagens dos ensaios por compressão diametral, a saber:

- a. A deformação permanente junto aos frisos de carregamento é indesejável para a avaliação do potencial de fissuração das misturas asfálticas.
- b. Os ensaios só devem ser feitos sob tensão-controlada.
- c. A distribuição de deformações no centro da amostra é razoavelmente não-linear.

Os autores retificam, entretanto, que os erros na medição de deslocamentos feita a partir da disposição adequada de sensores em vãos adequados, como por exemplo, utilizando distâncias pequenas o suficiente de modo a ficar longo da zona afetada pelos frisos de carregamento, podem ser superados. A questão de deformação-controlada *versus* tensão-controlada pode ser considerada insignificante se um modelo real do material puder ser desenvolvido. A terceira desvantagem mencionada também pode ser superada através do uso de soluções teóricas apropriadas que validem as medições atuais.

Esta última problemática vem sendo alvo de avaliações há alguns anos no país e no exterior. A exemplo, citam-se os trabalhos de Kim (1988), Drescher *et al.* (1997), Lee e Kim (1998), Hjelmstad *et al.* (2000), Gibson *et al.* (2002), Souza e Soares (2003), Theisen *et al.* (2005).

Um estudo de Bonaquist *et al.* (1986) avaliou vários métodos para determinação do módulo de elasticidade. O estudo lançou mão de ensaio de campo e laboratório e também de correlações teóricas e empíricas existentes. Concluiu o estudo, a partir de comparações entre deflexões medidas e previstas, que, para os materiais estudados, o ensaio de módulo de resiliência por tração indireta é o mais apropriado para uso com a teoria de camadas elásticas.

2.3.1.1 Princípio do ensaio

A Figura 2.6 mostra um desenho esquemático do tipo de equipamento utilizado no ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral mais utilizado no país. O ensaio consiste basicamente, da aplicação de uma tensão desvio pulsante – controlada por uma válvula 3 vias conectada a um temporizador – através de um cilindro de pressão. A carga gerada pela ação da pressão de ar comprimido liberada pela válvula 3 vias (solenóide) é medida pela célula de carga e então distribuída pelos frisos de carregamento ao corpo-de-prova. O deslocamento resultante é medido pelo LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*) preso ao corpo-de-prova por um suporte. Este deslocamento é então amplificado, por um condicionador de sinais, e armazenado em um sistema de aquisição de dados para análise.

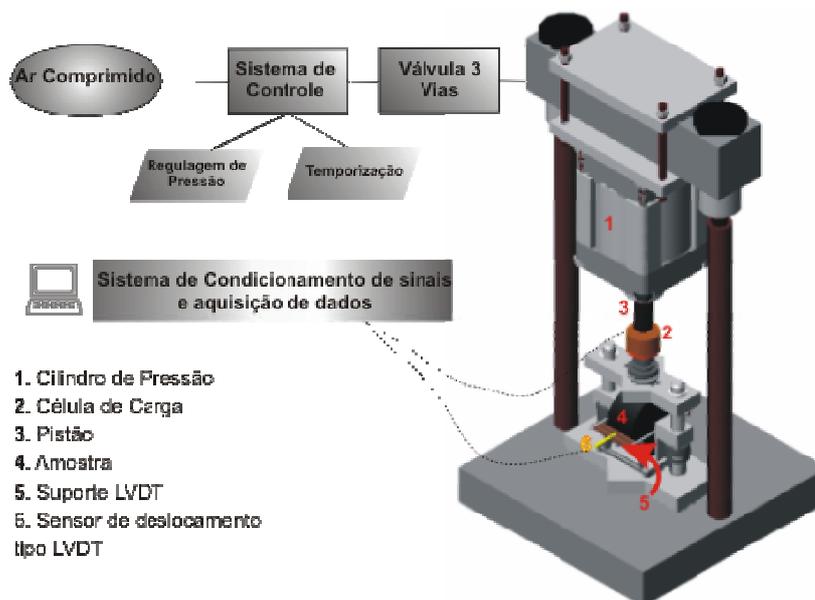


Figura 2.6 – Esquema do equipamento para ensaio de MR por compressão diametral.

O princípio de aplicação de carga é o mesmo do ensaio de compressão diametral, porém neste, além de o carregamento ser pulsante, ao invés de estático e monotônico, o corpo-de-prova não é levado à ruptura. O carregamento é de magnitude equivalente a um percentual da resistência à tração da mistura, usualmente ao redor de 15%. Para o cálculo do MR é então considerada a carga à que o corpo-de-prova está submetido por ação do carregamento cíclico e o deslocamento gerado por ele, como mostra a Figura 2.7.

A Figura 2.8 mostra um resultado típico das curvas de carga e deslocamento durante um ensaio de módulo de resiliência. A partir destes gráficos é então determinado o valor da carga pulsante aplicada e do deslocamento resiliente para a determinação do MR.

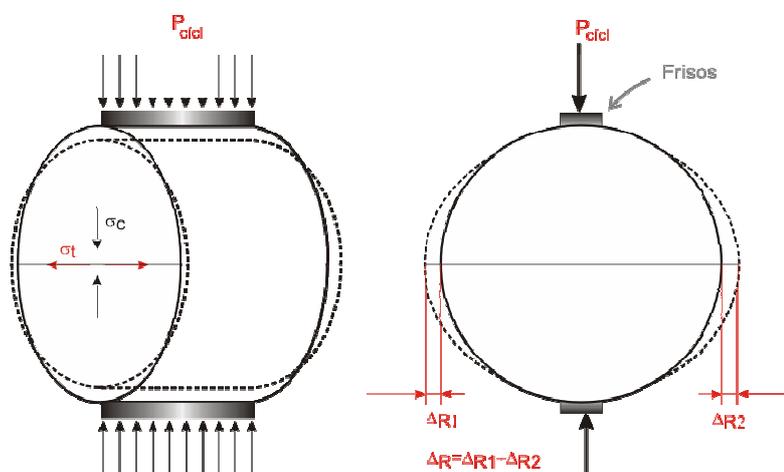


Figura 2.7 – Esquema do carregamento do corpo-de-prova no ensaio de MR

Onde:

- P_{cicl} = carga cíclica aplicada
 Δ_{R1} = parcela 1 do deslocamento resiliente
 Δ_{R2} = parcela 2 do deslocamento resiliente
 Δ_R = deslocamento resiliente total
 σ_c = tensão de compressão no centro do corpo-de-prova
 σ_t = tensão de tração no centro do corpo-de-prova

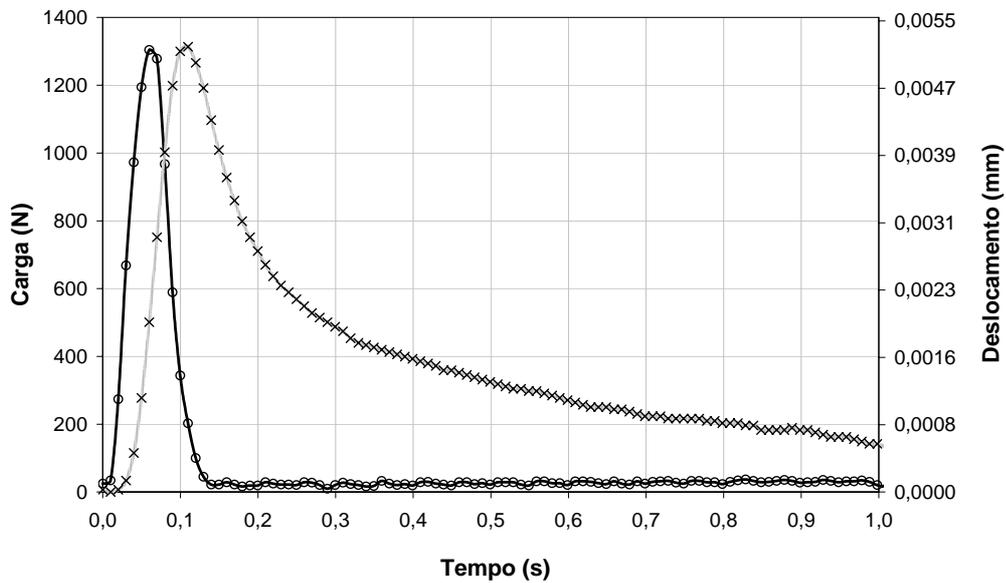


Figura 2.8 – Pulso de carga e deslocamento típicos em um ensaio de MR

2.3.1.2 Equacionamento do cálculo do módulo de resiliência

Frocht (1948), *apud* Preussler (1983)⁵, desenvolveu expressões pra o cálculo das tensões de tração e compressão que ocorrem no plano diametral horizontal, perpendicular a uma carga concentrada “P”, como mostra as equações da Figura 2.4 na página 12 deste trabalho. A expressão para cálculo da deformação específica (ε_x), no diâmetro horizontal é dada pela equação 2.10.

$$\varepsilon_x = \frac{2P}{E\pi td} \left[\frac{4d^4 - 16d^2x^2}{(d^2 - 4x^2)^2} + (1 - \nu) \right] \quad (2.10)$$

⁵ PREUSSLER, E. S. Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço. 1983. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

Onde:

ε_x = deformação específica num ponto distante x do centro

Outros símbolos já definidos anteriormente

O deslocamento elástico total (Δ) é obtido pela integração da equação 2.10, no intervalo de $\left(-\frac{d}{2}, +\frac{d}{2}\right)$, representada na equação 2.11, mostrada abaixo.

$$\Delta = \int_{-\frac{d}{2}}^{+\frac{d}{2}} \varepsilon_x dx \quad (2.11)$$

Desta integração é possível se obter a equação 2.12 para cálculo do módulo de elasticidade (E) do corpo-de-prova, quando solicitado por uma carga concentrada aplicada.

$$E = \frac{P}{\Delta t} (\nu + 0,2734) \quad (2.12)$$

Símbolos já definidos anteriormente

Pela solução desenvolvida por Hondros (1959), segundo Gonzalez (1975), para uma carga distribuída por frisos de carregamento, conforme discutido no item 2.2 deste trabalho, o valor da deformação de tração a uma dada carga (ε_t), do módulo de elasticidade (E) no diâmetro horizontal, e do coeficiente de Poisson (ν) são dados pelas equações 2.13, 2.14 e 2.15.

$$\varepsilon_t = \frac{X}{l} \frac{\left[\int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} \frac{\sigma_{rx}}{P} - \nu \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} \frac{\sigma_{\theta x}}{P} \right]}{\left[\int_{-R}^{+R} \frac{\sigma_{rx}}{P} - \nu \int_{-R}^{+R} \frac{\sigma_{\theta x}}{P} \right]} \quad (2.13)$$

$$E = \frac{P}{X} \left[\int_{-R}^{+R} \frac{\sigma_{rx}}{P} - \nu \int_{-R}^{+R} \frac{\sigma_{\theta x}}{P} \right] \quad (2.14)$$

$$\nu = \frac{\int_{-R}^{+R} \frac{\sigma_{ry}}{P} + R \int_{-R}^{+R} \sigma_{rx}}{R' \int_{-R}^{+R} \sigma_{\theta x} + \int_{-R}^{+R} \sigma_{\theta y}} \quad (2.15)$$

Onde:

ε_t = deformação de tração

X = deformação horizontal total a uma dada carga

l = comprimento sobre o qual a deformação é estimada

R = raio do corpo-de-prova

R' = coeficiente angular da linha de melhor ajuste entre a deformação vertical Y e a deformação horizontal X correspondente.

Outros símbolos já definidos anteriormente

Gonzalez (1975) ainda ressaltava que estas equações requerem que as integrações sejam feitas utilizando-se programas computacionais. Entretanto, para um dado diâmetro de corpo-de-prova e uma dada largura do friso de carregamento estas equações podem ser simplificadas e usadas sem o auxílio de programas. A Tabela 2.1, elaborado por Anagnos *et al.*(1972), apresenta estas equações para corpos-de-prova de diâmetro 101,6mm e 152,4mm e friso de carregamento de largura igual a 12,7mm.

Tabela 2.1 – Equações para cálculo das propriedades de tração em corpos-de-prova cilíndricos sob carregamento distribuído com relação $a/2R=1/8$ e $a/2R=1/12$

FONTE: Anagnos (1972)

| <i>Propriedade em Tração</i> | <i>Diâmetro do corpo-de-prova</i> | |
|--|---|--|
| | 4in (101,6 mm) | 6in (152,4mm) |
| Resistência à Tração (RT) (Pa) | $0,156 \frac{P_{rup}}{t}$ | $0,105 \frac{P_{rup}}{t}$ |
| Coeficiente de Poisson (ν) | $\frac{0,0673DR - 0,8954}{-0,2494DR - 0,0156}$ | $\frac{0,04524DR - 0,6804}{-0,16648DR - 0,00694}$ |
| Módulo de Elasticidade (E) (Pa) | $\frac{S_h}{t} [0,9976\nu + 0,2692]$ | $\frac{S_h}{t} [0,9990\nu + 0,2712]$ |
| Deformação Total de tração $\varepsilon_t, \mu_{units}$ | $X_T \left[\frac{0,1185\nu + 0,03896}{0,2494\nu + 0,0673} \right]$ | $X_T \left[\frac{0,0592\nu + 0,0175}{0,1665\nu + 0,0452} \right]$ |

Onde:

X_T = deformação horizontal total (mm)

DR = taxa de deformação $\frac{Y_T}{X_T}$ (coeficiente angular da reta de melhor ajuste entre a deformação vertical Y_T e a deformação horizontal correspondente X_T até a carga de ruptura P_{rup}).

S_h = módulo tangente horizontal $\frac{P}{X_T}$ (coeficiente angular da linha de melhor ajuste entre a carga P e a deformação horizontal total X_T para cargas até a carga de ruptura)

Outras símbolos já definidos anteriormente

Note-se que a equação de módulo de elasticidade presente na Tabela 2.1 para corpos-de-prova de diâmetro 101,6mm, é a equação que deu origem àquele normalizada no Brasil pelo DNIT, sob a norma DNER ME 133/94, apresentada pela equação 2.16, baseado no trabalho de Preussler (1983).

$$MR = \frac{P_{cicl}}{\Delta t} (0,9976\nu + 0,2692) \quad (2.16)$$

Símbolos já definidas anteriormente

Zhang (1997), a partir das equações de Hondros – já apresentadas nas equações 2.1, 2.2, 2.4 e 2.5, e suplementadas pelas equações de deformações derivadas da Lei de Hook, equações 2.17 e 2.18 (estado plano de tensões), e equações 2.19 e 2.20 (estado plano de deformações), apresenta para avaliação dos parâmetros elásticos E e ν as equações 2.21 e 2.22 (estado plano de tensões) e equações 2.23 e 2.24 (estado plano de deformações).

Para Estado Plano de Tensões

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} (\sigma_{xx} - \nu\sigma_{yy}) \quad (2.17)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} (\sigma_{yy} - \nu\sigma_{xx}) \quad (2.18)$$

Para estado Plano de Deformações

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu\sigma_{yy} - \nu^2(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] \quad (2.19)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu\sigma_{xx} - \nu^2(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] \quad (2.20)$$

Deslocamento Horizontal e Vertical para Estado Plano de Tensões

$$\Delta U_{2mR} = \frac{P}{Et} (I_1 - \nu I_2) \quad (2.21)$$

$$\Delta V_{2nR} = \frac{P}{Et} (I_4 - \nu I_3) \quad (2.22)$$

Deslocamento Horizontal e Vertical para Estado Plano de Deformações

$$\Delta U_{2mR} = \frac{P}{Et} [I_1 - \nu I_2 - \nu^2(I_1 + I_2)] \quad (2.23)$$

$$\Delta V_{2nR} = \frac{P}{Et} [I_4 - \nu I_3 - \nu^2(I_3 + I_4)] \quad (2.24)$$

Onde:

ε_{xx} = deformação no eixo x

ε_{yy} = deformação no eixo y

σ_{xx} = tensão no eixo x

σ_{yy} = tensão no eixo y

ΔU_{2mR} = variação do diâmetro da seção na direção x

ΔV_{2nR} = variação do diâmetro da seção na direção y

$I_{1,2,3,4}$ = coeficientes em função da relação $a/2R$ e m,n (ver Tabela 2.2)

Outros símbolos já definidos anteriormente

Para validade das equações apresentadas, deve ser considerado um setor centralmente locado no eixo horizontal x de comprimento $2mR$, e um setor centralmente locado no eixo y de comprimento $2nR$ devem ser considerados, tal que $0 < m, n < 1$, conforme mostra a Figura 2.9.

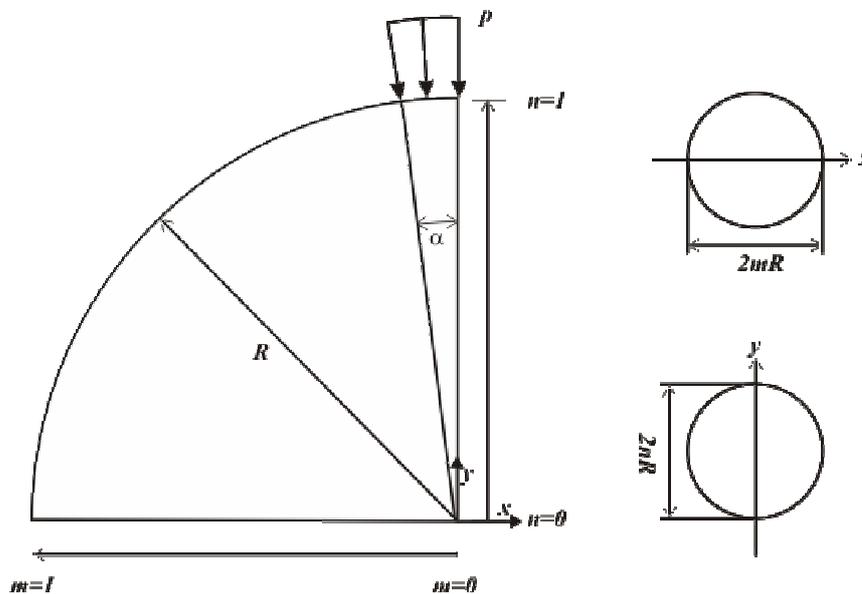


Figura 2.9 – Consideração de m, n nas equações apresentadas por Zhang

A Tabela 2.2 apresenta os valores dos coeficientes I_1 , I_2 , I_3 e I_4 para homogeneização das equações para a relação $a/2R = 1/8$ (largura do friso de carregamento / diâmetro do corpo-de-prova) e m, n (distância relativa do ponto de análise de deslocamento à origem).

Tabela 2.2 – Valores das Constantes $I_{1,2,3,4}$ para equações 2.21 à 2.24 para $a/2R=1/8$
 FONTE: Zhang *et al.* (1997)

| m, n | I_1 | I_2 | I_3 | I_4 |
|-------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 0,25 | 0,144357 | -0,450802 | 0,155789 | -0,488592 |
| 0,50 | 0,233936 | -0,780056 | 0,307445 | -1,069463 |
| 0,75 | 0,265925 | -0,952670 | 0,430875 | -1,934486 |
| 1,00 | 0,269895 | -1,000000 | -0,062745 | -3,587913 |

Para o cálculo do módulo, deve-se isolar a constante E na equação referente ao deslocamento medido (vertical e/ou horizontal), conhecer a relação $a/2R$ (largura do friso/diâmetro do corpo-de-prova) e a distância que os pontos de avaliação do deslocamento estão do centro do corpo-de-prova.

No caso dos ensaios convencionais de MR para misturas asfálticas, os cilindros utilizados como amostras (corpo-de-prova Marshall) são usualmente de pequena altura t , assim, toma-se para avaliação do módulo, as equações 2.21 e 2.22 (estado plano de tensões) para avaliação do módulo e do coeficiente do Poisson. Desta forma, assim como prevêm a norma ASTM D-4123 (1995) e o Protocolo SHRP P07 (1993), para uma relação $a/2R = 1/8$ e $m=n=1$ (medida de deslocamento entre os extremos do diâmetro), as equações para o cálculo do MR e do coeficiente de Poisson podem ser explicitadas pelas equações 2.25 e 2.26. O termo I_3 é desconsiderado devido à sua pequena magnitude.

$$E = \frac{P}{t \cdot \Delta U_{2R}} (0,27 + \nu) \quad (2.25)$$

$$\nu = -3,59 \frac{\Delta U_{2R}}{\Delta V_{2R}} - 0,27 \quad (2.26)$$

Note-se que há três diferentes fórmulas encontradas para cálculo do MR para misturas asfálticas no escopo da bibliografia consultada, a saber:

- Equação 2.12 – Solução para carga concentrada segundo Frocht (1948)
- Equação 2.16 – Solução para carga distribuída por friso de carregamento baseada nas equações de Hondros (1959), proposta por Anagnos *et al.*(1972).
- Equação 2.25 – Solução para carga distribuída por friso de carregamento baseada nas equações de Hondros (1959) suplementadas pelas equações de deformações derivadas da Lei de Hook, apresentada por Zhang (1997).

Todas elas, entretanto, apresentam coeficientes muito próximos para a determinação do MR. Aparentemente, a diferença entre as equações 2.16 e 2.25 não passa de aproximações dos coeficientes apresentados para efeito de simplificação. A máxima variação para o cálculo do MR entre as equações apresentadas será de 1%.

Salienta-se que a equação 2.25 é a utilizada por várias normas internacionais para cálculo do MR, como por exemplo: ASTM (1995), AASHTO (1996), AS (1995), EN (2004), BSI (1993). É importante ressaltar que a referida equação só tem validade para medições de deslocamento feito entre os extremos do corpo-de-prova [deslocamento medido de (-r,+r)].

Há algumas recomendações de procedimentos para determinação do MR, como Protocolo P07 do LTPP, versão 1.1 de agosto de 2001, e NCHRP 1-28A, de janeiro de 2004, que sugerem que a medição dos deslocamentos resilientes seja feita a partir de sensores de deslocamento colados nas faces dos corpos-de-prova em pontos distantes $-r/2$ e $+r/2$ do centro da face. Quanto este sistema é utilizado, o cálculo do MR deverá ser feito utilizando outras equações, como prevê Zhang (1997), em sua abordagem apresentada anteriormente.

Há ainda outras formulações existentes para o equacionamento do cálculo do módulo de resiliência. Acredita-se, entretanto, que as equações registradas neste documento sejam as de maior relevância e de uso mais frequente.

2.3.1.3 Sensibilidade do módulo de resiliência

Muitos são os estudos dedicados a avaliar os fatores aos quais o módulo de resiliência é sensível e em que magnitude isto ocorre. Alguns destes fatores que influenciam o comportamento das misturas asfálticas são: tipo de agregado, graduação, teor e propriedades do ligante asfáltico, densidade, entre outros.

Adicionalmente, as variáveis ambientais, como temperatura, umidade e qualquer outro fator que altere as propriedades do material durante sua vida de serviço, influem no MR. O efeito da temperatura nas propriedades de elasticidade de misturas asfálticas já foi largamente estudado. No Brasil, as últimas pesquisas sobre este assunto foram de Specht (2004) e Marques (2004). Widyatmoko (2002), relata que para uma variação de 1°C um material asfáltico pode variar sua rigidez em até 10%.

Brown e Foo (1989) dizem que como a norma americana ASTM D-4123 faz a média do MR a partir de três corpos-de-prova e a duas orientações é introduzido três fontes de erro, ou variação, a saber: erro experimental, associado a erros aleatórios que ocorrem na medição do MR – geralmente função do operador e tipo de equipamento utilizado; variação com a orientação – relacionado com a homogeneidade do corpo-de-prova; variação simples, que é associada à variação do MR dentro do grupo de corpos-de-prova. Há ainda o efeito combinado destas três fontes que também resulta variação na determinação do MR. Como resultado da pesquisa realizada para quantificar esta variabilidade, foi verificado que a menor fonte de variação foi o erro experimental. Comparado a outros dois métodos de medidas de

deformação, o sistema utilizado pela norma ASTM D-4123 (LVDTs de ponta bolhada retrátil colocado em contato com o corpo-de-prova), com uso adicional de membrana entre o corpo-de-prova e o LVDT, foi o que apresentou menor erro de medição. Adicionalmente, constataram que a homogeneidade diminui com o aumento do tamanho máximo de agregado. A variação no módulo de resiliência causado por diferentes orientações é mínima e não tem efeito significativo. Este é a menor variação dentre as fontes apresentadas.

Finalmente, concluíram que, dos componentes analisados, o último, variação simples, foi o que mais contribui para a dispersão dos resultados. Para corpos-de-prova extraídos de campo, encontrou-se uma variação nos resultados de 22% a 35%, enquanto em corpos-de-prova de laboratório, este percentual cai para 16% a 27%. A única forma de reduzir este efeito, de acordo com os autores, é utilizando um maior número de corpos-de-prova testados.

Outro fator importante da variabilidade do ensaio, que será abordado nesta dissertação, é a sua falta de padronização. A forma e carregamento, incluindo magnitude, o modo, a frequência, a duração e o período de descanso entre pulsos de carga são muito significativos, além dos procedimentos de cálculo do deslocamento resiliente, de desenvolvimento do ensaio e fatores peculiares ao equipamento.

Apesar de haver pesquisas sobre estas temáticas, a evolução dos sistemas de aplicação de carga, medição de deslocamentos e aquisição de dados fazem com que os limites de erro há uma década atrás sejam hoje limites pouco adequados. Busca-se, assim, através de padronizações mais exigentes, margens de erro menores, e, conseqüentemente, valores mais repetitivos e confiáveis de MR.

a) Forma do pulso de carga

Huang (2004) diz que o tipo e duração do carregamento usado em ensaios de cargas repetidas devem simular o que de fato ocorre em campo. Quando uma carga de roda está consideravelmente distante de um dado ponto do pavimento, a tensão neste ponto é nula. Quando a carga de roda está diretamente acima deste ponto, a tensão neste será máxima. É, portanto, razoável assumir que pulsos de carga tenham a forma de um semi-seno-verso⁶

⁶ Miguens (1996): se denomina semi-seno-verso de um ângulo A à expressão $ssvA = \frac{1}{2}(1 - \cos A)$

(*haversine*) ou, ainda, triangulares, cuja duração depende da velocidade do veículo e da posição do ponto do pavimento em análise.

Barksdale (1971), investigou pulsos de carga verticais em diferentes pontos de pavimentos flexíveis. De acordo com seus estudos, o pulso de carga pode ser simulado por uma função do tipo semi-seno-verso ou triangular, como mostra a Figura 2.10.

Medina e Motta (1995) mostram, através da Figura 2.11, a explicação de por quê o tempo de pulso ou duração de carregamento varia com a profundidade e porque a forma de um semi-seno-verso prevalece a pequenas profundidades e a forma de triângulo isósceles achatado a grandes profundidades.

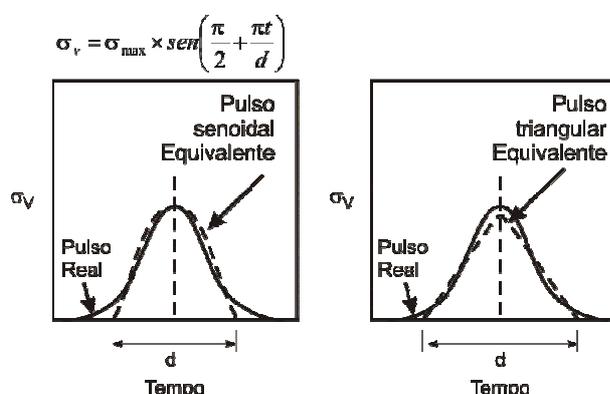


Figura 2.10 – Forma de pulso de carga de semi-seno-verso e triangular
 Fonte: Huang (2004)

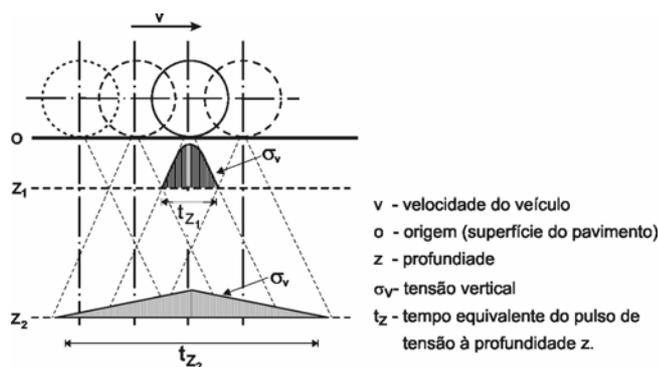


Figura 2.11 – Tempo de carga variável com a profundidade
 Fonte: Medina e Motta (1995)

Barksdale *et al.* (1997), em seu relatório de pesquisa 1-28A preparado para o NCHRP, evidenciam que a forma de onda adotada para o carregamento cíclico usada no ensaio de MR, tanto pela norma americana ASTM D-4123 quanto pelo protocolo SHRP P07, deve ter a forma de um semi-seno-verso, conforme mostra a Figura 2.12.

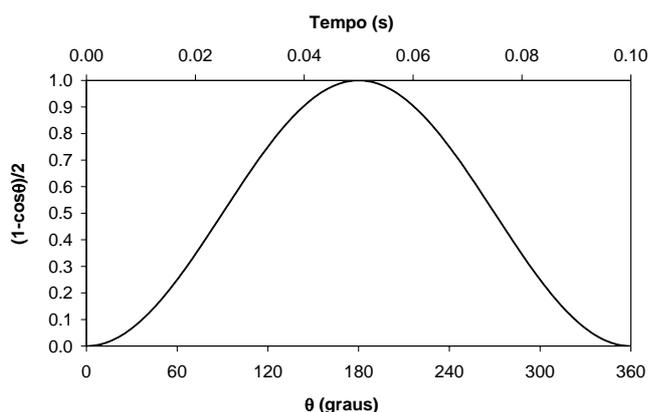


Figura 2.12 – Onda de carregamento do tipo semi-seno-verso usada nos ensaios de MR

Gonçalves (2002), em sua tese de doutorado, estudou o desempenho de pavimentos flexíveis a partir de ensaios acelerados instrumentados, em verdadeira grandeza, com o simulador linear de tráfego UFRGS-DAER. Em seqüência, Azambuja *et al.*(2004), também utilizando simulação de tráfego em verdadeira grandeza na mesma instalação, fizeram um estudo comparativo de recapamentos asfálticos com uso de sensores instalados na face inferior do revestimento. Os autores mediram pulsos de tensão durante a solicitação aplicada por um semi-eixo de rodas duplas trafegando a velocidade de 6km/h, como mostra a Figura 2.13.

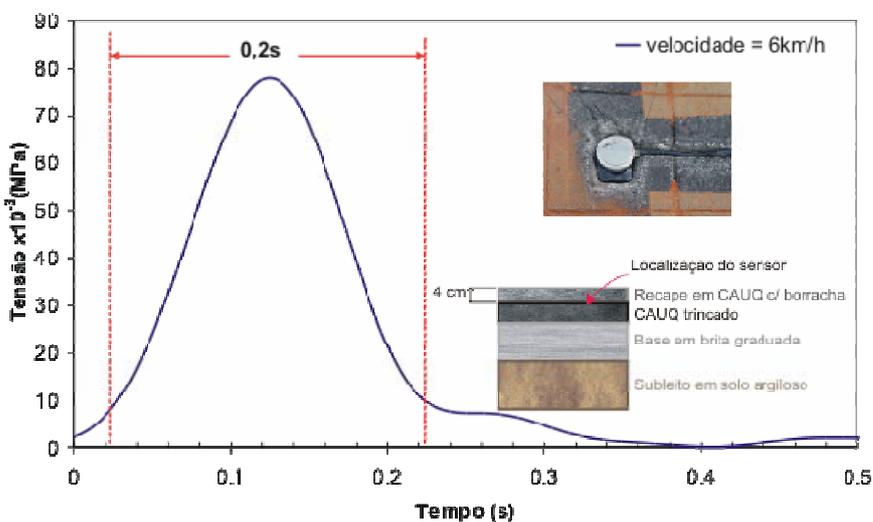


Figura 2.13 – Pulso de tensão em pavimento ensaiado pelo Simulador UFRGS – DAER/RS

Nota-se que o pulso de tensão observado na Figura 2.13 apresenta uma forma coincidente com aquela apresentada na Figura 2.12, considerando-se um pulso de tensão medido a 4cm de profundidade na base de um revestimento de concreto asfáltico modificado com adição de borracha.

É possível então considerar que o formato do pulso de carga a ser adotado no ensaio de MR deve ser de um semi-seno-verso, para desta forma simular o tipo de carregamento a que está exposta uma camada asfáltica durante as solicitações de tráfego.

b) Duração e frequência do pulso de carga e período de descanso

Após considerar a inércia e os efeitos viscosos baseado em pulsos de tensão vertical medidos pelo *AASHO Road Test*⁷, Barksdale (1971), propôs para um pavimento flexível uma relação entre a velocidade do veículo e a profundidade de análise com o tempo equivalente do pulso de tensão vertical, como mostra a Figura 2.14.

Verifica-se que os 0,2s de pulso de carga registrado no trabalho de Azambuja *et al.*(2004), conforme a Figura 2.13, para uma velocidade de tráfego de 6km/h, a uma profundidade de 40mm, estão em conformidade, de forma aproximada com o estudo proposto por Barksdale (1971) – que considerou uma estrutura composta por um revestimento asfáltico de 100mm, base de brita de 380mm e subleito de argila siltosa.

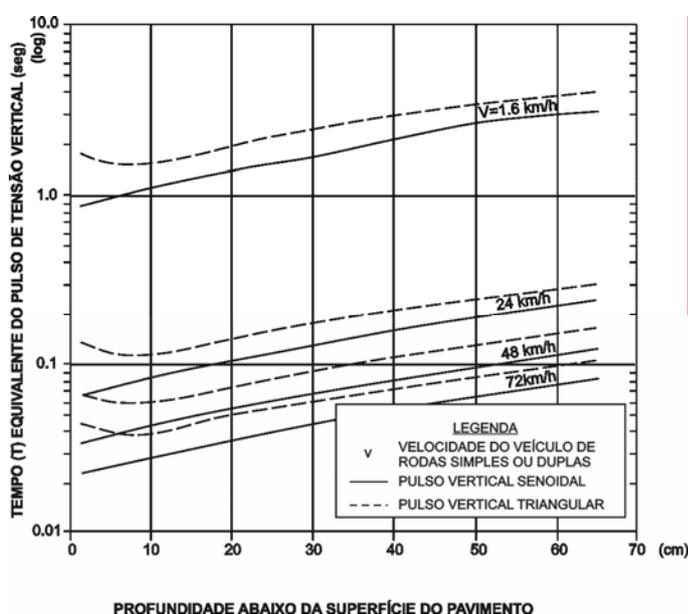


Figura 2.14 – Pulso de tensão vertical sob pulso de carga triangular e senoidal
Fonte: Barksdale (1971)

Medina e Motta (1995) também apresentam gráficos de tempo de pulso de carga vertical para ensaios triaxiais de cargas repetidas a partir de equivalência estabelecida entre as escalas de distância e tempo, sendo a velocidade o fator de conversão. A partir de análises com o

⁷ Teste de Rodovias da AASHO (*AASHO Road Test*) – série de experimentos feitos pela AASHO para quantificar a contribuição do tráfego à deterioração da superfície de rodovias

programa de elementos finitos FEPAVE2⁸, realizou-se o estudo de quatro estruturas típicas de pavimentos do país. As análises utilizaram os parâmetros elásticos usualmente obtidos em ensaios de cargas repetidas bem como dados estrangeiros de medições de sensores instalados em pavimentos em verdadeira grandeza.

A Figura 2.15 apresenta o resultado da análise realizada pelos autores para uma estrutura composta de 150mm de solo granular, como material de reforço, 300mm de brita, como material de base, e 100mm de CBUQ, como material de revestimento, para um pulso de carga com distribuição triangular. Para efeito comparativo, os resultados de Barksdale (1971) apresentados na Figura 2.14 foram superpostos. Observa-se que as inclinações das curvas de Barksdale (1971) são iguais às obtidas para o caso estudado, porém os tempos de pulso de carga apresentados por ele são menores do que os analisados por Medina e Motta (1995).

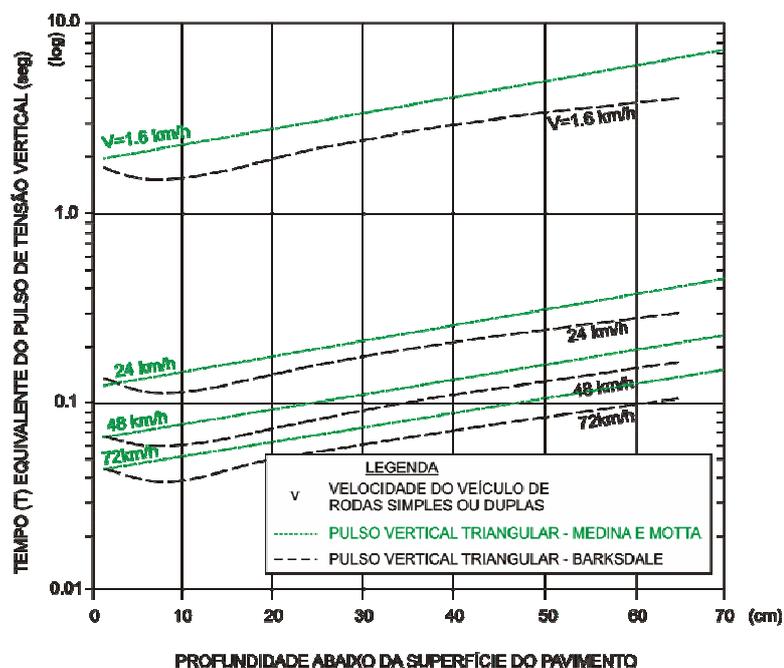


Figura 2.15 – Pulso de tensão vertical sob pulso de carga triangular em estrutura analisada por Medina e Motta (1995)

Os autores concluem em seu trabalho que o revestimento em concreto asfáltico induz tempos de pulso de carga maiores do que os correspondentes em um tratamento superficial. É importante salientar que o estudo não majorou os tempos em consideração aos efeitos de

⁸ FEPAVE2 (*Finite Element Analysis of Pavement Structure*) – programa computacional de análise de tensões e deformações de camadas de pavimentos pelo método dos elementos finitos desenvolvido pela Universidade de Berkeley – EUA.

viscosidade. Mesmo assim, constatou-se que os tempos de pulso que Barksdale (1971) encontrou são menores que os das estruturas brasileiras estudadas.

Em relação ao tempo de pulso de carga a ser utilizado, pode se constatar a partir dos gráficos propostos que considerando velocidades acima de 30km/h e espessura de camadas de revestimento asfálticas menores do que 200mm – requisitos bastante razoáveis para os pavimentos rodoviários – o tempo de carregamento não deve exceder os 0,1s.

As normas e recomendações de ensaio pesquisadas (ASTM D-4123-82/95, AASHTO TP31-96, AS 2891.13.1 – 1995, Protocolo P07 – LTPP, NHCRP pesquisa 1-28 e 1-28A e DNER 133/94) delimitam como sendo os mesmos 0,1s o tempo de carregamento a que corpos-de-prova cilíndricos devem ser submetidos durante o ensaio de MR por compressão diametral. Apenas a norma européia NF EM 12697-26 /2004 e a norma britânica BSI DD 213:1993 delimitam o tempo de elevação da carga no pulso em $0,124 \pm 0,004s$, conforme será mostrado na Figura 2.17.

Acredita-se que o estabelecimento deste valor de 0,1s como referência nos ensaios de MR, se deve naturalmente aos estudos anteriores apresentados. Entretanto, fica bastante claro pela análise dos mesmos dados que a duração deste carregamento deveria ficar aquém do proposto para as velocidades acima dos 30km/h. Em se tratando de pavimentos rodoviários, cuja velocidade de operação fica normalmente próximo dos 80km/h, este tempo cairia, considerando a proposta de Barsksdale (1971), para 0,02s a 0,03s. Atribui-se tal proposição à limitação dos sistemas pneumáticos, que devido ao efeito de compressibilidade do ar, torna muito difícil a aplicação de tempos menores do que 0,1s.

Na literatura, encontram-se poucos casos de ensaio de MR com tempo de pulso de carga menor do que 0,1s. Loulizi *et al.* (2006), na busca do efeito comparativo entre MR e módulo complexo utilizaram pulsos de carga de 0,03s, sob a justificativa de estar simulando o efeito de caminhões em movimento e de ensaios de FWD⁹. Não há, entretanto, registro de sensibilidade do valor de MR face à variação no tempo de carregamento ensaiado.

Widyatmoko (2002), em seu estudo sobre aspectos práticos de ensaios relacionados ao desempenho de materiais asfálticos, apresenta o efeito da variação do módulo de rigidez em função do tempo de elevação da carga no pulso. A Figura 2.16 mostra os resultados obtidos.

⁹ FWD (*Falling weight deflectometer*) – dispositivo utilizado em ensaios de campo para obtenção do módulo de elasticidade das camadas constituintes a partir de retroanálise dos dados coletados.

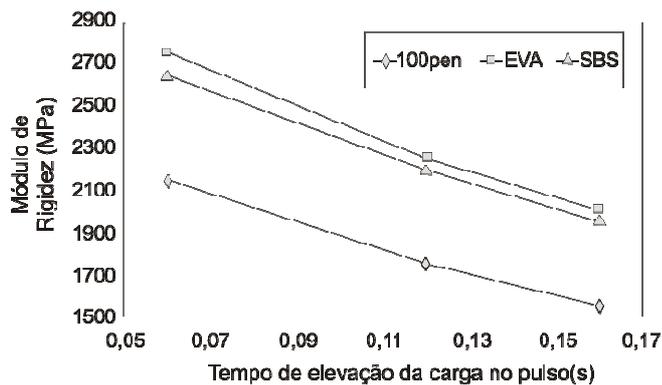


Figura 2.16 – Efeito do tempo de elevação da carga no pulso na rigidez.

Fonte: Widyatmoko (2002)

Chama-se atenção, entretanto, que o tempo de elevação, para um pulso do tipo semi-seno-verso, equivale à metade do tempo de carregamento. Para que se possa claramente identificar o efeito apresentado por Widyatmoko (2002), é importante que se verifique a forma do pulso de carga dos ensaios por ele realizados. Como o referido trabalho faz menção ao balizamento dos ensaios pela proposta de norma BSI DD 213:1993, ilustra-se a forma de pulso de carga preconizado pela mesma através da Figura 2.17. O tempo de elevação da carga no pulso recomendado pela DD213 é de $0,124 \pm 0,004s$, o que resultaria num tempo de carregamento, em um pulso de carga do tipo semi-seno-verso, de aproximadamente $0,248s$.

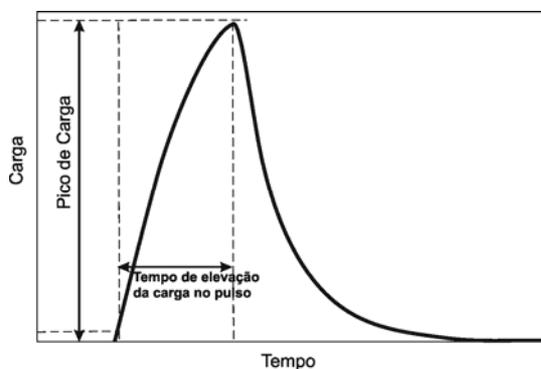


Figura 2.17 – Forma do pulso de carga preconizado pela proposta de norma BSI DD213:1993¹⁰

Widyatmoko (2002) conclui que é esperada uma maior rigidez para ensaios com tempos de elevação menores, isto é, carregamentos mais curtos, ou frequências maiores.

Monismith *et al.* (1961), *apud* Adedimila (1975)¹¹, avaliaram o efeito da frequência de carregamento. Fizeram este estudo baseados no dano relativo induzido pelo carregamento

¹⁰ Como é visto no item 2.4.5, esta norma é sucedida pela norma europeia EN 12697-26:2004, que preconiza este mesmo tipo de forma de carregamento.

¹¹ ADEDIMILA, A. S.; KENNEDY, T. W. Fatigue and resilient characteristics of asphalt mixtures by repeated-load indirect tensile test. Research Report 183-5, Center for Highway Research, The University of Texas at Austin, August 1975

cíclico através da análise da taxa do módulo de ruptura em um determinado número de repetições, pelo módulo de ruptura do corpo-de-prova em uma condição de não sollicitação. Utilizando os resultados de frequências de 3, 15 e 30 aplicações por minuto (0,05Hz, 0,25Hz e 0,5Hz, consecutivamente) eles concluíram que não havia efeito aparente produzido pela frequência de aplicação de carga.

Raithby e Sterling (1970), por sua vez, investigaram o efeito do período de descanso na vida de fadiga através de corpos-de-prova prismáticos submetidos à tração e compressão diretas. Eles apresentaram resultados que sugerem que para períodos curtos de descanso a vida de fadiga aumenta rapidamente com o aumento do período de descanso e que parece atingir um valor limite à aproximadamente 0,4s, além do qual o aumento na duração do período de descanso tem pequeno efeito adicional.

Deacon (1965) relatou que o aumento na duração do tempo de carregamento produz vidas de fadiga mais curtas. Isto foi obtido mantendo-se a frequência de carregamento constante, o que, por sua vez, resultou num decréscimo do período de descanso.

Bonnaure *et al.* (1982) executaram uma ampla investigação laboratorial da influência do período de descanso nas características de fadiga de misturas asfálticas. Concluíram em seu estudo que períodos de descanso têm efeito benéfico na vida de fadiga, e que este benefício atinge efeito máximo com períodos de descanso da ordem de 25 vezes o tempo do ciclo de carregamento. Registram também os autores, que com o aumento da temperatura de ensaio, aumenta o efeito benéfico deste período.

Em relação ao efeito do período de descanso no módulo de resiliência (Witezak, 1978; Bonnaure *et al.*, 1982; Terrel *et al.*, 1974), Barksdale *et al.* (1997) relatam que sob baixas temperaturas e tempos de carregamento curtos a dependência ao período de descanso não é significativa, mas que sob temperaturas médias e carregamentos longos este quadro é reverso. Assim, para temperaturas médias e carregamentos longos a resposta viscoelástica deve ser incluída como uma variável de caracterização do material.

Monismith (1989) sugere que a taxa entre o período de descanso e o período de carregamento é importante, pois afeta diretamente a intensidade de deformações recuperáveis que ocorrem, afetando, conseqüentemente, o módulo de resiliência. Quanto mais próximo for o período de

descanso do período de carregamento, menor será a deformação recuperável e, portanto, valores maiores de MR serão medidos.

Fairhurst *et al.* (1990) investigaram o efeito do período de descanso na magnitude do valor do módulo de resiliência. Os resultados indicaram que o módulo de resiliência aumenta levemente para períodos de descanso menores. Isto não é surpreendente, uma vez que períodos de descanso menores para amostras entre pulsos de carregamento resultam em menos tempo para a recuperação das deformações, levando, assim, a valores maiores de MR.

Os resultados de testes executados por Barksdale *et al.* (1997) em corpos-de-prova de campo, indicam pequeno efeito do período de descanso nos valores de MR. Em alguns casos o valor de MR chegou a aumentar levemente com o aumento do período de descanso. Isto foi observado com mais frequência nos corpos-de-prova mais velhos. Em conjunto com uma série de ensaios realizados, Barksdale *et al.* (1997), sugerem que o uso de um período de carregamento de 0.1s seguido de um período de descanso de 0.9s é adequado para minimizar o efeito deste último.

c) Variação da deformabilidade com o número de ciclos

Um corpo-de-prova quando submetido ao ensaio de MR por compressão diametral, assim como em qualquer tipo de carregamento cíclico, apresenta uma evolução de sua deformabilidade com o crescimento do número de ciclos aplicados. Isto se deve em grande parte a energia resistente das fibras solicitadas que têm uma fração dissipada a cada ciclo aplicado.

Adedimila e Kennedy em 1975 promoveram um estudo-referência sobre o comportamento de fadiga em misturas asfálticas. Os autores recorreram a Finn (1967) para definir fadiga em materiais asfálticos: “um fenômeno de fratura sob tensões flutuantes ou repetidas tendo seu máximo valor abaixo da resistência à tração do material”.

Há varias abordagens para a interpretação da vida de fadiga a partir de ensaios de laboratório. Preussler, em 1983, em um estudo pioneiro no país com ensaios de fadiga sob compressão diametral, mostra as relações logarítmicas lineares obtidas entre a vida de fadiga, N_f , e a diferença de tensões no centro do corpo-de-prova bem como com a deformação específica resiliente.

Apesar de ser analisado o comportamento à fadiga das misturas estudadas neste trabalho, para efeito de caracterização das mesmas, este tema está fora do escopo principal desta dissertação. Discussões detalhadas são abordadas na bibliografia clássica de mecânica dos pavimentos (Yoder e Witczak, 1975; Ullidtz, 1987; Huang, 2004; Medina e Motta, 2005).

É importante, entretanto, conhecer a evolução da deformabilidade com o crescimento do número de ciclos N aplicados, para que se possa definir a variabilidade do módulo de resiliência em função de N .

Widyatmoko (2002) em seu trabalho diz que o número de aplicação de pulsos de condicionamento no ensaio de cargas repetidas, usado para fornecer um assentamento correto do corpo-de-prova sob os frisos de carregamento, com o objetivo de obter resultados mais confiáveis e repetitivos, pode levar a variação no valor do módulo de rigidez.

Sangata e Bassani (1999), *apud* Widyatmoko¹², relataram que um aumento no número de pulsos de condicionamento pode levar a reduções nos resultados de módulo, com variações de 6,5% a 10%. A variação nos resultados de módulo, entre um plano α e um plano perpendicular a α do corpo-de-prova, seria de +10% e -20% do valor médio. Conclui o autor que, para que a variação fique dentro de um limite de $\pm 5\%$, 5 a 10 pulsos de condicionamento podem ser considerados como suficiente.

Adedimila e Kennedy (1975) mostram a variação do módulo resiliente instantâneo (MRi) e do módulo resiliente total (MRt) em função da repetição de cargas. O efeito de carregamento cíclico na deformação resiliente apresenta-se com uma função do número de ciclos, podendo ser dividido em três zonas: (1) Zona de condicionamento: a porção inicial das curvas, até aproximadamente 10% da vida de fadiga - a forma da curva não é definida, pode variar de côncava para cima à côncava para baixo. (2) Zona de estabilidade: a porção das curvas entre 10% e aproximadamente 80% da vida de fadiga – esta porção é aproximadamente linear, com uma gradual redução no módulo com o aumento do número de ciclos; também representa a vida útil da vida de fadiga; (3) Zona de falha: os últimos 20% da vida de fadiga, na qual a curva tende a rapidamente decair, com queda acentuada na magnitude do módulo. A Figura 2.18 ilustra um exemplo deste comportamento.

¹² WIDYATMOKO, I. Some practical aspects of performance related testing of bituminous materials. In: EUROPEAN SYMPOSIUM ON PERFORMANCE OF BITUMINOUS AND HYDRAULIC MATERIALS IN PAVEMENT. Zoorob, Collop e Brow, editors. 2002, Nottingham. Proceedings... p. 99-104, Nottingham, 2002.

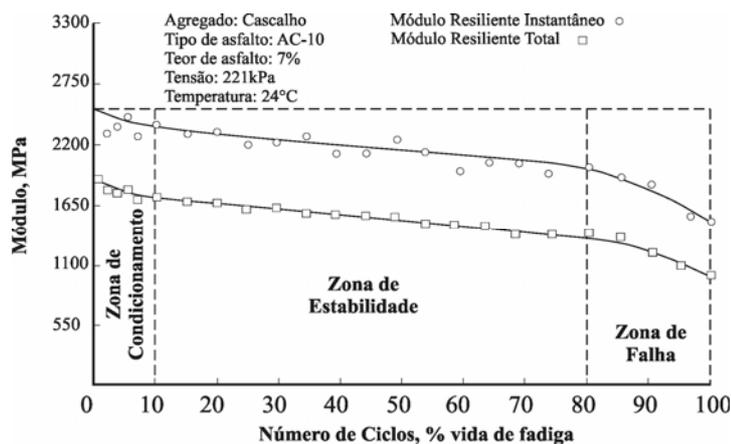


Figura 2.18 – Evolução do MRi e MRt em função do número de ciclos aplicado
 FONTE: Adedimila e Kennedy (1975)

A partir da análise do gráfico apresentado, pode se concluir que, para as condições estudadas, o módulo resiliente ao longo de um número N de ciclos teve uma redução de aproximadamente 60% no MRi e 50% no MRt. Registra-se o fato de que os ensaios realizados por Adedimila contaram com pulsos de carga de duração de 0,4s a uma frequência de 1Hz.

d) Efeito do coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson (ν) é muitas vezes arbitrado durante os ensaios de MR. Devido às dificuldades de medição dos deslocamentos verticais, visto que os frisos de carregamento impelem o uso de pequenos sensores (caros e trabalhosos). Para que isto seja viável, acaba-se na maioria das vezes adotando-se valores de coeficiente de Poisson baseado na literatura, tendo-se aí mais uma fonte de variabilidade no ensaio.

A Figura 2.19 mostra a sensibilidade do módulo de elasticidade à sua variação, considerando o cálculo do ν de acordo com a equação 2.26. Observa-se que uma variação de $\pm 0,05$ no valor de ν resulta em uma flutuação no valor de MR de $\pm 9\%$.

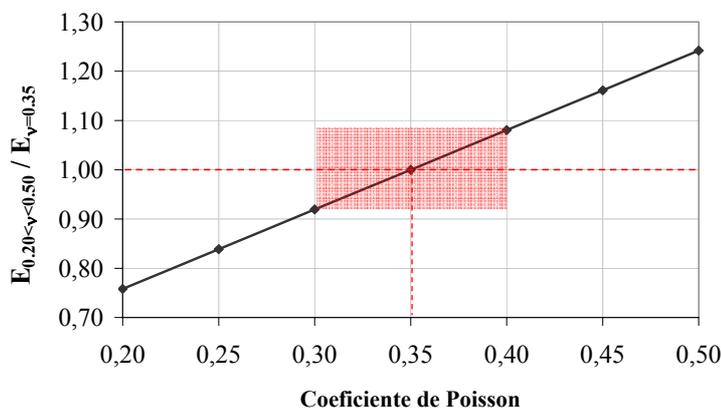


Figura 2.19 – Sensibilidade do valor do MR ao coeficiente de Poisson

Marques (2004) disserta sobre valores de coeficiente de Poisson a serem adotados quando não há disponibilidade de medi-los. Sugere que para ensaios de MR a 5°C seja utilizado o valor de coeficiente de Poisson igual a 0,20, para 25°C o valor de 0,30 e para 40°C o valor de 0,50. Nas temperaturas intermediárias de 10°C e 35°C, utilizou uma interpolação linear entre estes valores de maneira a obter coeficientes de Poisson de 0,21 para ensaios a 10°C e 0,42 para ensaios a 35°C.

Barksdale *et al.* (1997) sugerem que o coeficiente de Poisson deve estar submetido aos seguintes limites: para ensaios a 5°C, $0,10 \leq \nu \leq 0,30$; Para ensaios a 25°C, $0,25 \leq \nu \leq 0,45$; Para ensaios a 40°C, $0,40 \leq \nu \leq 0,50$. Relatam também que quando houver dúvida sobre a validade do coeficiente de Poisson calculado, por estarem fora dos limites preconizados, devem-se assumir valores de 0,20 para 5°C, 0,35 para 25°C e 0,50 para 40°C.

Segundo a norma BSI DD213-93, os pares de valores, temperatura de ensaio, coeficiente de Poisson a serem adotados para cálculo do módulo de rigidez são: 0°C, $\nu = 0,25$; 10°C, $\nu = 0,25$; 20°C, $\nu = 0,35$ e 30°C, $\nu = 0,45$.

Dentre as citações feitas por Barksdale et al. (1997), encontram-se registros de autores que, assumindo $\nu = 0,35$, encontraram módulos de resiliência 1,5 a 2 vezes maiores do que os obtidos através de ν calculado a partir de valores medidos de deslocamentos horizontais e verticais. O autor cita que há aqueles que acreditam ser melhor adotar coeficientes de Poisson, por crer que a sua medição pode ser afetada pelo efeito de cisalhamento próximo aos frisos.

McGee (1989) concluiu a partir de um estudo experimental que módulos de resiliência obtidos com coeficiente de Poisson igual a 0,35 resultam em valores mais dispersos do que aqueles usando ν calculado a partir dos deslocamentos verticais e horizontais medidos. Também verificaram que o coeficiente de Poisson aumenta com o aumento do nível de tensão utilizado, da temperatura e do teor de asfalto.

Adedimila e Kennedy (1975) registram em seu trabalho a variação do coeficiente de Poisson resiliente total (calculado a partir dos deslocamentos resilientes totais) com a evolução do número de ciclos. Parece haver um aumento gradual deste coeficiente com o aumento do número de ciclos, até um percentual de aproximadamente 70 a 80% da vida de fadiga do material. Após este limite, há um rápido aumento do coeficiente de Poisson, indicando a não-linearidade das deformações devido ao efeito de plastificação do corpo-de-prova.

Moura e Bernucci (2004) relatam que o coeficiente de Poisson provavelmente apresenta variações em função da carga utilizada no ensaio de MR, mas que há carência de estudos sobre o tema. Recomendam os autores que se proceda à medição dos deslocamentos verticais e horizontais durante a realização do ensaio de MR, conforme preconizado pela norma ASTM D-4123-82, para avaliação da possível variação do ν em função no nível de tensão aplicado.

e) Cálculo das Deformações Resilientes

Encontra-se uma outra parcela de contribuição significativa na variabilidade do MR no cálculo dos deslocamentos horizontais e verticais. Na literatura pesquisada, parece haver uma carência de informações acerca deste tema. Pouco se relata sobre as variações na determinação dos deslocamentos resilientes.

Considerando-se que o comportamento de uma mistura asfáltica se aproxima de um comportamento visco-elasto-plástico, é de se esperar que os deslocamentos apresentem componentes elásticas, viscoelásticas e plásticas, como ilustra esquematicamente a Figura 2.20. Tendo em vista que o MR se aproxima do módulo de elasticidade, porém, determinado sob carregamentos repetidos, a parcela a ser computada no cálculo do MR tende a ser aquela cujos deslocamentos sejam essencialmente elásticos. Evidencia-se, assim, a importância de uma acurada determinação dos deslocamentos resilientes para cálculo do MR.

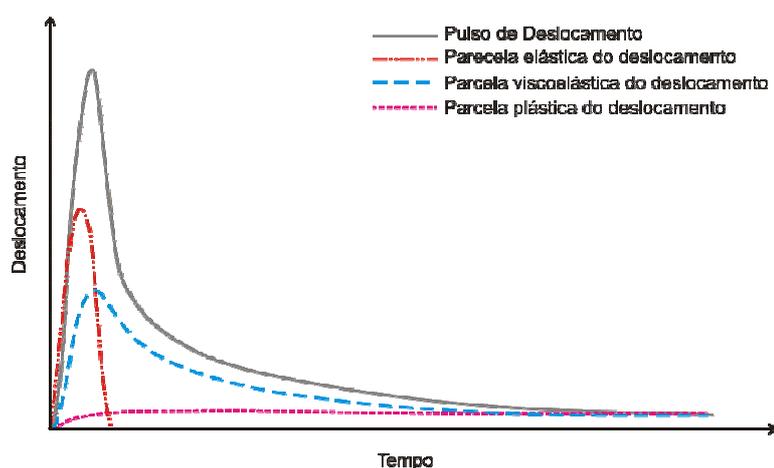


Figura 2.20 – Ilustração esquemática das componentes de deslocamento resiliente

Adedimila (1975) desenvolveu um trabalho medindo três tipos de deslocamentos na mesma curva: um chamado de deslocamento resiliente instantâneo (V_{RI} e H_{RI}) – que procura separar apenas a parcela elástica; outro chamado de deslocamento resiliente total (V_{RT} e H_{RT}) – que aparentemente registra o deslocamento da parcela elástica mais a viscoelástica; e uma terceira

parcela chamada deslocamento total (V_T e H_T) que registraria as três parcelas em conjunto – elástica + viscoelástica + plástica . A Figura 2.21 ilustra este procedimento. As letras V e H referem-se aos deslocamentos verticais e horizontais, respectivamente.

O trabalho citado, entretanto, não contempla limites de tempo utilizados para determinação de cada uma destas variáveis. Acredita-se que por se tratar de registros gráficos feitos em impressoras de fita papel, que todas as medições foram obtidas manualmente e que não seguiram, assim, critérios mais elaborados para determinação daqueles deslocamentos citados.

Com o advento de sistemas digitais de aquisição de dados esta tarefa passou a ser rotina executada por programas de computador. Procedimentos de norma mais recentes como AASHTO TP31-96, o protocolo LTPP/FHWA P07 e a pesquisa NCHRP 1-28 e 1-28A especificam o cálculo dos deslocamentos a partir de algoritmos matemáticos, promovendo rotinas sistemáticas de cálculo dos deslocamentos resilientes.

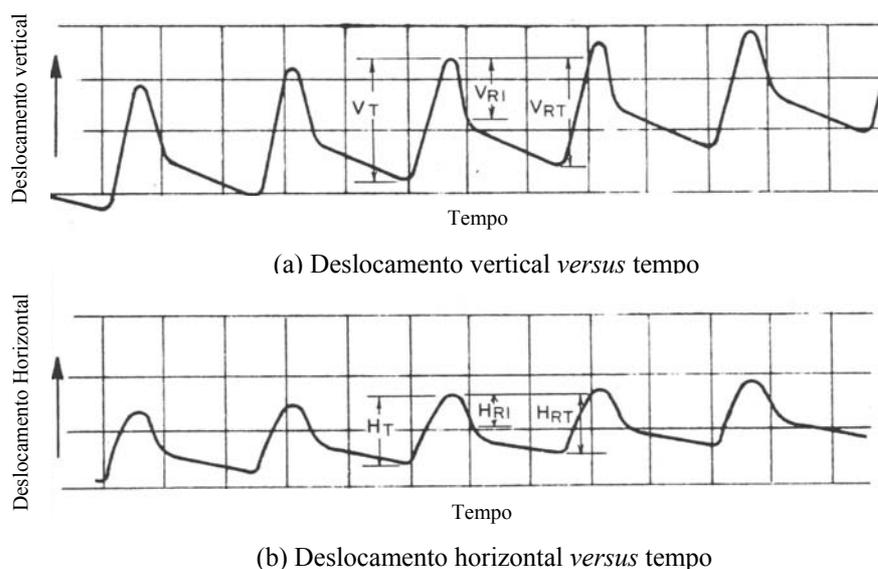


Figura 2.21 – Deslocamentos totais e deslocamentos resilientes instantâneos e totais
Fonte: Adedimila (1975)

As pesquisas 1-28 e 1-28A do NCHRP utilizam uma sistemática diferente daquelas propostas pelo LTPP FHWA P07 e AASHTO TP31-96. O diferencial está no uso de duas regressões hiperbólicas, uma linear mais uma reta tangente, ao invés de duas regressões lineares para determinação do deslocamento resiliente instantâneo. Estes algoritmos estão esquematicamente apresentados na Figura 2.22.

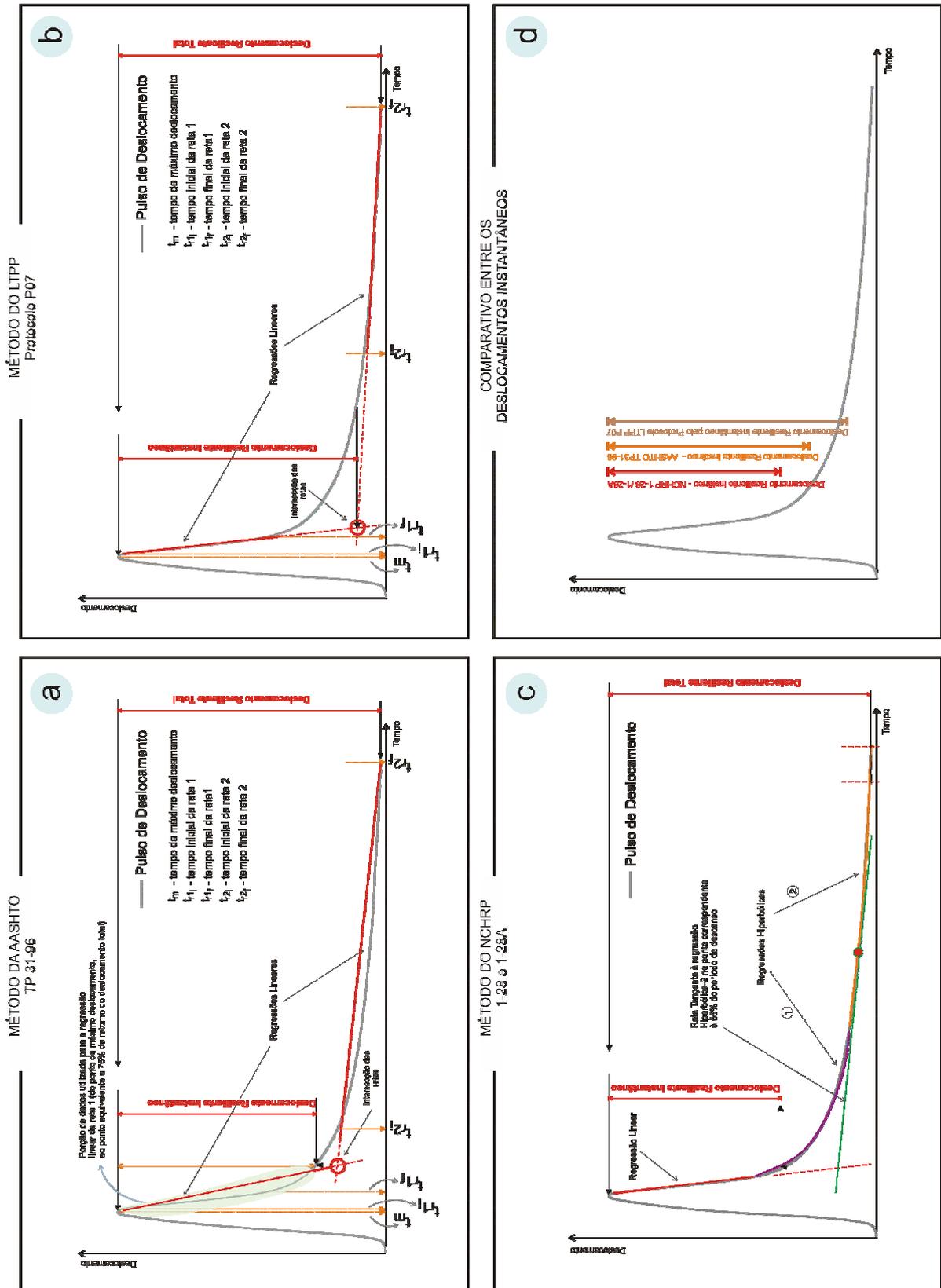


Figura 2.22 – Esquema de algoritmos para determinação dos deslocamentos resilientes

Os tempos que especificam o início e o fim das retas das Figura 2.22 (a) e (b) estão apresentados na Tabela 2.3. As normas citadas consideram que os ensaios de MR devem ser feitos à frequência de 1Hz com pulso de carga de duração de 0,1s. Desta forma, todos os tempos apresentados na tabela só valem nestas condições.

Tabela 2.3 – Tempos usados pela AASHTO e LTPP para determinação dos deslocamentos resilientes instantâneos

| | <i>AASHTO</i> | <i>LTPP - FHWA</i> |
|-----------|-----------------------------------|-----------------------------|
| | <i>TP31-96</i> | <i>P07</i> |
| t_{r1i} | $t_m + t_{1\text{ponto}}^{13}$ | $t_m + 0,01s$ |
| t_{r1f} | $t_{75\% \text{ do desl. total}}$ | $t_m + 0,034s$ |
| t_{r2i} | 0,25s | 0,400s |
| t_{r2f} | 1,00s | 1,00s + $t_{1\text{ponto}}$ |

Observa-se, a partir da análise comparativa ilustrada na Figura 2.22 (d), que há uma considerável fonte de variação do valor de MR a partir dos cálculos de deslocamento, em essência, naqueles denominados instantâneos. As figuras apresentadas anteriormente foram produzidas a partir de um pulso de deslocamento real e mostram variações do menor deslocamento em relação ao maior deslocamento medido na ordem de 70%. Neste caso, a variação de 30% no valor do MR, a partir de um mesmo pulso de deslocamento, seria tão somente função do algoritmo de cálculo do deslocamento resiliente utilizado.

Uma detalhada discussão do algoritmo de cálculo da pesquisa 1-28 e 1-28A do NCHRP, apresentado na Figura 2.22 (c) será apresentado adiante neste trabalho.

Há ainda normas que não especificam o algoritmo a ser utilizado para determinação dos deslocamentos resilientes, como é o caso da ASTM D-4123-95, AS2891.13.1 – 1995, BSI DD213-93 e NF EM 12697-26/2004.

f) Procedimentos de ensaio

Roque e Buttlar (1992) promovem uma análise sobre o mais acurado sistema de posicionamento dos sensores para medição dos deslocamentos resilientes. De acordo com os autores, o efeito de abaulamento em corpos-de-prova cilíndricos, apresentado na Figura 2.23,

¹³ “ $t_{1\text{ponto}}$ ” significa o acréscimo de tempo até o próximo ponto medido – varia em função da taxa de aquisição que se utiliza no sistema gravador de dados.

durante o ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas, leva a um considerável erro na medição do deslocamento quando se utilizam sensores posicionados por meio de alças.

Sugerem, então, o uso dos mesmos colados às laterais do corpo-de-prova como meio de minimizar este erro. Propõem, ainda, uma metodologia de correção para que não haja quaisquer distorções nas medições realizadas nesta disposição de sensores devido à rotação dos suportes causada pelo abaulamento nas faces.

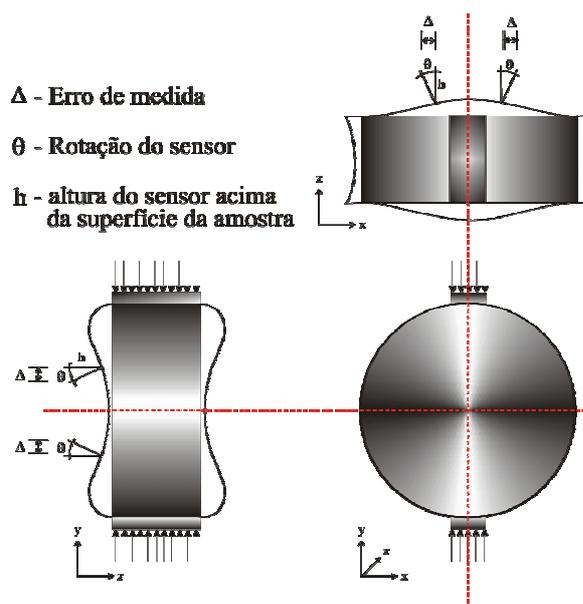


Figura 2.23 – Abaulamento não uniforme em corpos-de-prova sob tração indireta
Fonte: Roque e Buttlar (1992)

Uma vantagem adicional proposta deste sistema é a viabilização do cálculo do coeficiente de Poisson, uma vez que permite a medição dos deslocamentos tanto horizontais quanto verticais. Acredita-se, também, que com este sistema não haja qualquer restrição ao deslocamento ou efeito de amortecimento causado pela ação dos suportes dos sensores de deslocamento quando presos externamente.

O efeito de abaulamento nos sistema proposto por Roque e Buttlar (1992) faz com que os deslocamentos horizontais sejam superestimados e que os verticais sejam subestimados. Desta forma, tanto a determinação do MR quanto do coeficiente de Poisson fica prejudicada, daí a necessidade da correção proposta por eles. Quanto maior for o afastamento dos sensores da superfície do corpo-de-prova (h), maior será o erro medido. Os fatores de correção para medida dos deslocamentos horizontais são da ordem de + 8% do deslocamento real, enquanto aqueles para os deslocamentos verticais são de aproximadamente -5% do valor real (considerando $\nu=0,35$ e espessura do corpo-de-prova de 63,5mm).

A referida metodologia de correção dos deslocamentos só é válida para relações de distância entre sensores e diâmetro do corpo-de-prova de 1:4 e distância do centro dos sensores à superfície do corpo-de-prova de 6,35mm.

Kim e Wen (2002) apresentam em seu estudo sobre energia de fratura, a partir do ensaio de tração indireta, uma análise sobre medidas de deslocamento em corpos-de-prova sob compressão diametral. Utilizando-se de um sistema de medição de deslocamentos por correlação de imagem (DIC – *Digital Image Correlation*), é realizada uma análise para determinação de qual o melhor espaçamento entre sensores colados na face do corpo-de-prova a fim de não afetar nem as medições verticais pelo efeito de puncionamento dos frisos no corpo-de-prova, nem as medições horizontais e verticais pelo efeito de abaulamento, como visto anteriormente.

Dentre as considerações feitas para determinação do melhor espaçamento entre os sensores na face do corpo-de-prova, destaca-se a necessidade de medição da resposta a partir de um EVR¹⁴ (elemento de volume representativo). É comumente aceito que a taxa mínima entre o tamanho máximo de agregado e o espaçamento dos sensores seja de 1:3 ou 1:4.

Assumindo uma mistura com tamanho máximo de agregado de 19mm a uma taxa de 1:3 (tamanho máximo de agregado : espaçamento dos sensores), um espaçamento de 57mm satisfará o RVE. Considerando que na maioria das graduações utilizadas em misturas asfálticas densas convencionais o tamanho máximo de agregado é 19mm ou menor, um espaçamento de 50mm satisfará o RVE; parece, portanto, mais apropriado o uso deste espaçamento do que os 25mm adotado por Roque e Buttlar (1992).

Ainda conforme Kim e Wen (2002) o erro na medida dos deslocamentos horizontais pelo efeito de abaulamento parece aumentar com a redução no espaçamento entre os sensores, e que o oposto é verdadeiro para as medidas de deslocamentos verticais. Eles encontraram como erro devido ao abaulamento, tanto para medições de deslocamentos verticais quanto horizontais, valores menores de 5%. Para um espaçamento de 50mm sob temperatura de 20°C, o erro encontrado na referida pesquisa foi de 2,4% para medições horizontais e 2,5% para medições verticais sendo, portanto, passível de desconsideração.

¹⁴ EVR ou RVE (*Representative volume element*) é definido como o volume de um material no qual as propriedades do material são constantes e a resposta sob carregamento mecânico seja independente do tamanho de agregado e condições de contorno do corpo-de-prova.

Brown e Foo (1997), apesar de salientarem que o erro associado ao procedimento de ensaio não pode ser avaliado com maior precisão por serem usados sempre o mesmo equipamento, mesmo operador e mesmo procedimento, ele leva a variações no MR. Afirmam, entretanto, que o contato entre os LVDTs e o corpo-de-prova, presos através de uma alça externa, pode ser uma fonte de erro.

Barksdale *et al.* (1997) estudaram vários sistemas de montagem de LVDTs sobre o corpo-de-prova. Nesta pesquisa foi observado que dependendo do sistema de montagem utilizado podem ocorrer erros de medição dos deslocamentos, e conseqüente variação na medição do MR. Conclui o estudo que os erros devido ao efeito de giro quando do uso de LVDTs montados externamente, pode ser superado com o uso de sensores colados sob pontos nas faces do corpo-de-prova. Este último sistema apresenta, entretanto, alguma dificuldade no correto alinhamento na colagem dos pinos.

Tanto Al-sugair *et al.* (1992) quanto Brown e Foo (1997) identificaram também variações na medida do MR com função da carga utilizada no ensaio. Divergem, entretanto, em conclusão. Os autores do primeiro trabalho sugerem que, para reduzir a variação nas medidas na determinação do MR, uma carga próxima ao limite superior da RT especificado pela norma ASTM D4123-90 deve ser utilizada. Ressalva-se que a norma ASTM D-4123-82 (re-aprovada em 1995) recomenda valores de carga para o ensaio entre 10 a 50% da resistência à tração. Os autores do segundo trabalho recomendam que, para caracterização de misturas asfálticas, deve ser utilizado 15% da RT no ensaio de MR. Justificam os autores que uma redução de 15 para 10% da RT gera um aumento de 12% no valor do MR medido, enquanto um acréscimo de 15 para 20% acarreta em um decréscimo de 21% no MR medido.

Moura e Bernucci (2004) também registram em seu trabalho que a influência da carga no valor de MR é significativa. Recomendam, assim, o uso de uma carga próxima a 15% da carga de ruptura à tração para uso no ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas, uma vez que os deslocamentos horizontais mobilizados com este nível de tensão já são suficientes para determinação do MR.

g) Fatores peculiares aos equipamentos

Acredita-se que os fatores relativos aos equipamentos utilizados para determinação do módulo de resiliência possam, também, ser responsáveis pela sua variabilidade. Taxa de aquisição,

relação sinal-ruído, calibração de sensores e eficiência no sistema de carregamento parecem ser as fontes de variação mais evidentes dos sistemas atuais de ensaio de MR, que contam com tecnologias bastante superiores daqueles existentes há 10 anos atrás.

Barksdale *et al.* (1997) dissertam acerca dos diversos sistemas de aplicação de carga na forma de pórticos existentes para uso no ensaio de compressão diametral, discutindo a inércia e o atrito desenvolvido nos mesmos. Os quatro diferentes sistemas de carregamento testados foram: dispositivo Retsina, dispositivo MTS, dispositivo de Baladi e dispositivo de carregamento SHRP. Concluem os autores que há diferenças nos valores de MR dependendo do sistema de carregamento utilizado, ainda que em corpos-de-prova de material sintético. Atribuem ao atrito com as hastes-guia parte desta variação, que acaba por ser função da intensidade do atrito gerado e do alinhamento entre o pórtico de carregamento, o corpo-de-prova e o eixo de aplicação de carga.

Em relação à frequência de aquisição de dados para sistemas automatizados de ensaio de MR, conforme o teorema de Nyquist sobre teorias de amostragem, para amostrar um sinal temporal contínuo limitado em frequência a B Hz (ou $W = 2\pi B$ rad/s) e, posteriormente, reconstruí-lo perfeitamente, a mínima frequência de amostragem necessária é de $2B$ Hz (ou $2W$ rad/s), ou seja, o dobro da largura de banda do sinal. Considerando-se que os pulsos de carga no ensaio de MR têm duração de $0,1s$ e portanto frequência de $10Hz$, a mínima amostragem para reconstrução do sinal adquirido deve ser de $20Hz$, ou seja, 20 pontos por segundo. Naturalmente é desejável a maior sobre-amostragem possível, mas registra-se este valor para efeito comparativo com aqueles presentes nos equipamentos atuais, que raramente possuem taxas de aquisição abaixo dos 100 pontos por segundo.

Vianna (2002) faz um estudo sobre materiais sintéticos para confecção de corpo-de-prova padrão com vistas à calibração de equipamentos para ensaios resilientes. A partir da confecção de corpos-de-prova de poliuretano, nylon, acetal, polipropileno, polietileno e teflon puro, foram realizados ensaios triaxiais e de compressão diametral em um sistema automatizado concebido na COPPE/UFRJ. Como resultado do seu trabalho, ele concluiu que corpos-de-prova de polietileno e teflon são os mais recomendados para a calibração de ensaios de MR em compressão diametral.

Um último tópico a ser abordado acerca da variação do módulo de resiliência em função das características do equipamento utilizado no ensaio, é a relação sinal / ruído¹⁵ dos sensores de deslocamento. Assim como mostrado anteriormente, o cálculo da deformação resiliente é consideravelmente influenciado pelo algoritmo de cálculo. É possível verificar que variações nas regressões lineares e hiperbólicas provenientes de relações sinal/ruído inadequadas na medição dos deslocamentos podem ser fonte de consideráveis variações na determinação do MR. A Figura 2.24 ilustra um exemplo da variação de uma regressão linear em função do ruído associado à medida de um pulso de deslocamento resiliente. No caso ilustrado, o MR varia apenas em função da qualidade sinal / ruído em aproximadamente 15%.

Observa-se também na Figura 2.24 que o atraso do pico de deslocamento também é função do equipamento. Isto se deve à defasagem na aquisição de dados também inerente a cada sistema utilizado.

Como normalmente a relação sinal/ruído de um sistema é uma característica peculiar ao equipamento, quanto maior for a intensidade do ruído e menor for a magnitude da medição desejada, tão maior será a incerteza de medição resultante. Como medições de deslocamentos resilientes são da ordem de grandeza de μm , o ruído presente em sistemas de aquisição de dados com vistas ao uso em ensaios de MR deve ser consideravelmente reduzido.

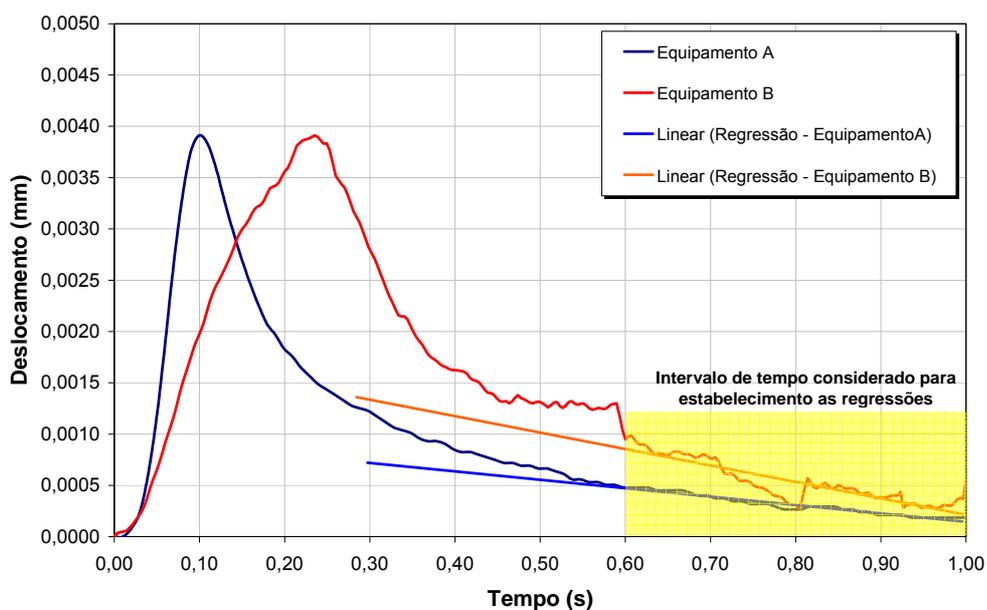


Figura 2.24 – Variação de uma regressão linear em função do ruído associado à medida.

¹⁵ Uma simples definição de ruído no sentido utilizado neste texto é: uma medida indesejável que registra oscilações provenientes de fontes externas associando ao sinal, monitorando imprecisões na medição.

2.3.2 Módulo complexo

O módulo complexo é a relação entre a tensão e a deformação para um material viscoelástico linear submetido a um carregamento de forma senoidal em função do tempo, t , que quando da aplicação de uma tensão $\sigma \times \text{sen}(\omega t)$ apresenta uma deformação $\varepsilon \times \text{sen}(\omega \times (t - \phi))$, apresentando um ângulo de fase, ϕ , em relação à tensão, conforme ilustra a Figura 2.25.

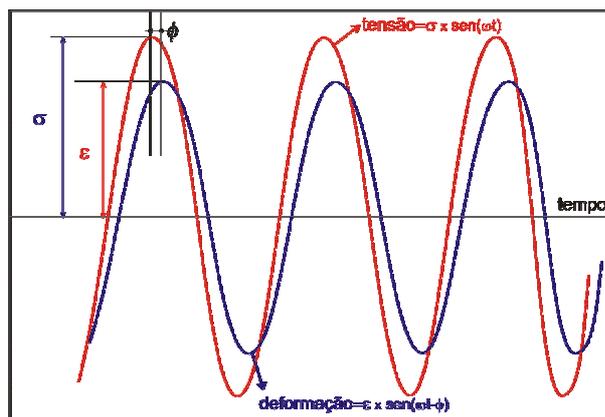


Figura 2.25 – Gráfico tensão *versus* deformação no ensaio de módulo complexo

O ensaio consiste basicamente de aplicações de carga senoidal a várias frequências, normalmente variando entre 0,1Hz e 30Hz e a várias temperaturas, usualmente no intervalo de -15° a 40°C , dependendo do procedimento de ensaio empregado.

A amplitude da deformação e do ângulo de fase dependem da frequência, ω , e da temperatura de ensaio. O módulo complexo, definido de acordo com a equação 2.27, é caracterizado por duas componentes, uma parte real, equação 2.28, a qual representa a energia armazenada no material, e uma parte imaginária, equação 2.29, que representa a energia perdida por atrito interno no material (Pais e Pereira, 2002). O ângulo de defasagem, ϕ , na equação 2.30, é definido como um indicador da viscosidade (ou elasticidade) do material. Para um material elástico puro, $\phi=0^{\circ}$, e para um material puramente viscoso, $\phi=90^{\circ}$. Ao módulo do módulo complexo, equação 2.31, denomina-se módulo de rigidez, e à relação entre a tensão e a deformação ao tempo de carregamento, t , para um material submetido a uma carga com uma velocidade de deformação controlada, denomina-se módulo secante, equação 2.32.

$$E^* = |E^*| \times (\cos(\phi) + i \times \text{sen}(\phi)) \quad (2.27)$$

$$E_1 = |E^*| \times \cos(\phi) \quad (2.28)$$

$$E_2 = |E^*| \times \text{sen}(\phi) \quad (2.29)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right) \quad (2.30)$$

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (2.31)$$

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} \quad (2.32)$$

Onde

E^* = módulo complexo

E_1 = parte real do módulo complexo

E_2 = parte imaginária do módulo complexo

ϕ = ângulo de defasagem

$|E^*|$ = módulo de rigidez

$E(t)$ = módulo secante

Outros símbolos anteriormente definidos

É também importante ressaltar que o módulo do módulo complexo, ou valor absoluto do módulo complexo é referido na literatura tanto como módulo de rigidez como também módulo dinâmico ou, ainda, módulo de deformabilidade. Há, entretanto, ainda, outros entendimentos para as mesmas denominações, a saber: módulo de rigidez – propriedade determinada a partir de ensaios resilientes, porém nos quais a determinação do deslocamento resiliente contempla a parcela elástica mais a parcela tempo-dependente, ou ainda, para definir o módulo determinado sob carregamento estático; módulo dinâmico – termo utilizado também para denotar qualquer tipo de módulo determinado em uma condição não-estática.

Este ensaio pode ser realizado em vários formatos de corpos-de-prova, sendo os mais conhecidos: cilíndricos de relação altura/diâmetro de 2:1 (diâmetro mínimo de 100mm) – método proposto por pesquisadores norte-americanos; e vigas trapezoidais à flexão em dois pontos (Figura 2.1 “m”) – método proposto por pesquisadores do LCPC. Este último grupo já está em fase de concepção de uma metodologia de determinação de módulo complexo a partir de corpos-de-prova paralelepípedicos, com o intuito de facilitar a fabricação destes para ensaio.

De acordo com La Roche (2004), os resultados do módulo complexo e do ângulo de fase são normalmente apresentados graficamente de diversas formas, a saber:

- Através de curvas isotermas do módulo complexo – resultados de $|E^*|$ versus frequência para cada uma das temperaturas ensaiadas, geralmente em coordenadas bi-logarítmicas. (Figura 2.26 a)
- Através de curvas isócronas do módulo complexo – resultados de $|E^*|$ versus temperatura para cada uma das frequências ensaiadas, geralmente em coordenadas monolog. (Figura 2.26 b)
- Curvas no plano de Cole e Cole (ou plano complexo) – E_1 (parte real) versus E_2 (parte imaginária) para cada temperatura ensaiada. Este tipo de gráfico não é muito preciso para valores baixos de módulo; nestes casos se utiliza o próximo tipo de representação. (Figura 2.26 c)
- Através de curvas mestras – resultante da translação das curvas “módulo-frequência” de diversas temperaturas, para uma mesma curva, através de equivalências tempo-temperatura. (Figura 2.26 d)
- Curvas no espaço de Black (*Black Diagram*) - resultados de $|E^*|$ versus ângulo de fase para cada uma das temperaturas ensaiadas, geralmente em coordenadas monolog. (Figura 2.26 e)

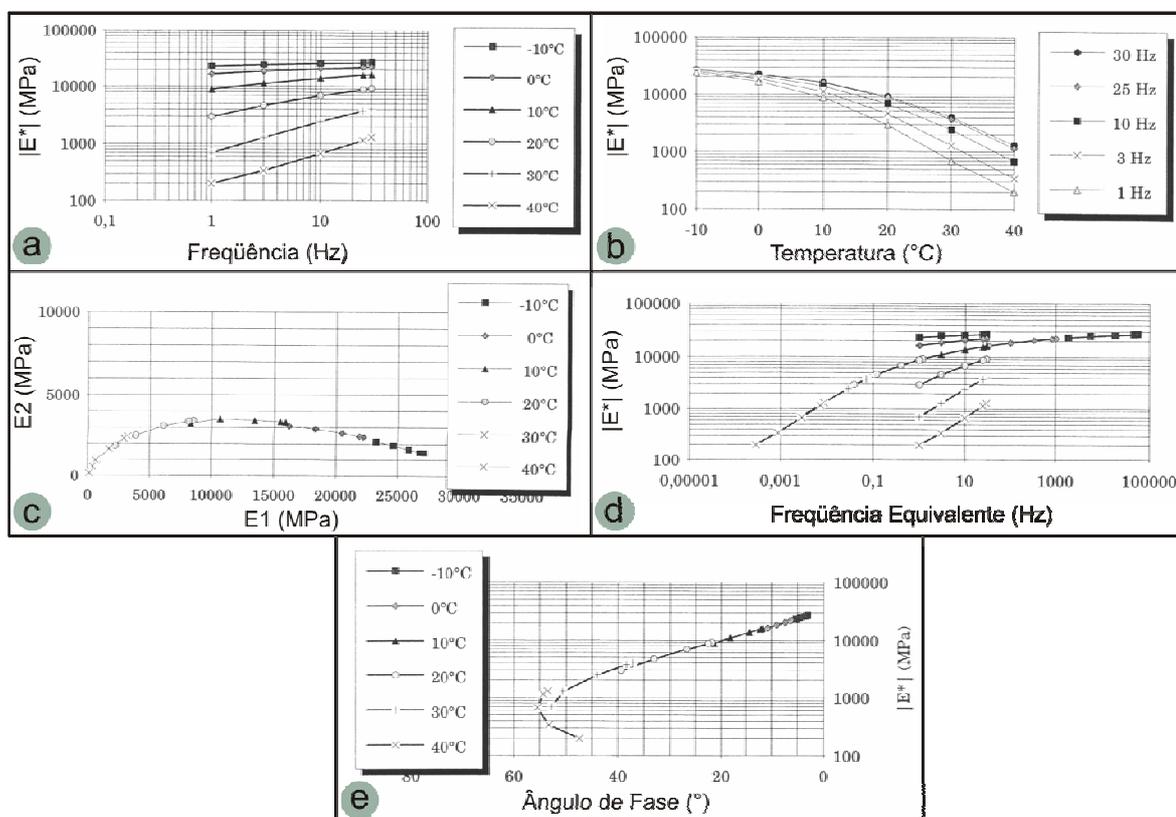


Figura 2.26 – Tipos de curvas utilizadas para representação do módulo complexo

Entende-se que o ensaio de módulo complexo é atualmente a melhor fonte de dados para determinação do comportamento tensão-deformação de misturas asfálticas. Entretanto, há de se comentar que além dos custos elevados relativos aos equipamentos necessários para teste, a confecção de corpos-de-prova é mais difícil do que a obtenção de corpos-de-prova para ensaio de MR.

A diferença entre um ensaio de módulo de resiliência e um ensaio de módulo complexo para misturas asfálticas é que o primeiro usa carregamentos de qualquer forma (usualmente do tipo semi-seno-verso, conforme discutido no item 2.3.1.3) com um dado período de descanso, enquanto o segundo aplica carregamentos do tipo senoidal ou do tipo semi-seno-verso sem períodos de descanso. O módulo é uma quantidade complexa, na qual a parte real representa a propriedade de rigidez dos materiais, enquanto a parte imaginária caracteriza a defasagem interna dos materiais (Huang, 2004).

Em um trabalho de Loulizi *et al.* (2006), faz-se a comparação entre módulo de resiliência e módulo dinâmico de misturas asfálticas. Relata o trabalho que para comparar os resultados obtidos por um ensaio de MR com pulso de carregamento com duração de 0,03s, deve-se proceder a um ensaio de módulo complexo à frequência de 5,2Hz. Concluem os autores que há uma forte correlação entre os valores de MR e módulo dinâmico nestas condições, e que esta correlação depende da mistura analisada. Para o caso particular pesquisado, a relação entre o módulo de rigidez ($|E^*|$) e o MR ficou em 1,07 para a mistura asfáltica de revestimento estudada (volume de vazios médio de 3,6%), e em 1,4 para a mistura asfáltica de base (volume de vazios médio de 6,2%).

2.4 NORMAS DE ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DE MR

Faz-se neste item uma breve descrição de alguns dos métodos de ensaio para determinação do módulo de resiliência em misturas asfálticas, ressaltando alguns pontos chave, principalmente em relação ao tipo de equipamento solicitado, aos procedimentos de ensaio e aos critérios de determinação dos deslocamentos resilientes.

Alguns pontos são comuns em todas as recomendações, como por exemplo: uso de corpos-de-prova cilíndricos de diâmetro nominal de 102 ou 152mm; carga aplicada por frisos côncavos

de largura igual a 12,7mm, para o primeiro diâmetro de corpo-de-prova, e 19mm para o segundo, e em ambos os casos com a curvatura do friso igual à do corpo-de-prova testado.

2.4.1 Norma norte-americana ASTM D-4123

A norma ASTM D-4123, de 1982 e revista em 1995, apresenta nível médio de detalhamento em relação às outras comentadas neste item. Sabe-se, entretanto, da existência de uma reformulação em tramitação, com a colaboração de pesquisadores brasileiros, que elevará o grau de detalhamento da mesma.

Recomenda ensaios de MR às temperaturas de 5°, 25° e 40°C (condicionadas em estufas termo-controladas) a uma ou mais frequências de ensaio, por exemplo, de 0,33, 0,5 e 1Hz.

O equipamento sugerido é do tipo eletro-hidráulico com gerador de funções capaz de produzir as formas de onda preconizadas, semi-seno-verso ou outra adequada, ou ainda sistemas pneumáticos disponíveis comercialmente ou produzidos em laboratório. A duração da carga deverá ser de 0,1s a 0,4s, chamando-se a atenção que esta é a variável mais importante e é, portanto, recomendado que se faça uso do menor tempo que puder ser gravado, sendo o 0,1s o mais representativo do carregamento transiente a que os pavimentos são expostos.

É recomendado o uso de dois sensores do tipo LVDT, de ponta retrátil ou de ponta colada ao corpo-de-prova, ou outro sistema adequado, presos em lados opostos no diâmetro horizontal. Deve-se proceder a duas medições de MR por corpo-de-prova; uma a 0° e a outra a 90°, obtidas pela rotação deste.

Quanto ao procedimento de ensaio, a norma preconiza a aplicação mínima de 50 a 200 ciclos de condicionamento. A carga de ensaio deverá ser de 10 à 50% da RT, ou, alternativamente, aplicar 4 à 35 N/mm da espessura do corpo-de-prova testado (para um corpo-de-prova de 63,5mm de espessura, a carga deve ficar entre 254N a 2223N).

Em relação à determinação dos deslocamentos resilientes, não se faz menção a algoritmos matemáticos, apenas há referência gráfica, como aquela mostrada na Figura 2.21, de onde devem ser determinados apenas os deslocamentos resilientes total e instantâneo. As equações para determinação do MR e do v são aquelas descritas nas equações 2.25 e 2.26,

respectivamente, sendo determinado um valor de cada, para cada deslocamento resiliente, totalizando dois valores de MR (total e instantâneo) e dois valores de v (total e instantâneo).

2.4.2 Norma norte-americana AASHTO TP-31-96

Esta norma foi inicialmente aprovada em 1994, e publicada oficialmente em 1996. Em janeiro de 2001 foi revisada. Pode ser considerada uma norma de alto grau de detalhamento. Recomenda ensaios às temperaturas de 5°, 25° e 40°C e à frequência de 1Hz. O pulso de carga preconizado é do tipo semi-seno-verso com duração de 0,1s. O equipamento sugerido é do tipo eletro-hidráulico com gerador de funções capaz de produzir a forma de onda descrita.

O sistema de registro de dados deve proporcionar informações de deslocamento e carga em tempo real. Tanto os deslocamentos horizontais quanto verticais devem ser obtidos, com o auxílio de LVDTs. Os LVDTs para leitura dos deslocamentos horizontais devem estar em contato efetivo com o corpo-de-prova através do uso de sensores de ponta retrátil em forma de meio-cilindro com diâmetro de 9,5mm, posicionados a meia altura do corpo-de-prova e presos em lados opostos no diâmetro horizontal. Os sensores verticais devem ser também de ponta retrátil e posicionados externamente ao corpo-de-prova, e equidistantes das hastes do pórtico de carregamento, de maneira a medir a aproximação dos frisos de contato.

Em relação ao procedimento de ensaio, o MR deve ser medido a partir da média dos deslocamentos de 5 pulsos gravados após 30 pulsos de carga ou mais. Quatro dos cinco pulsos de deslocamento devem estar dentro de uma faixa de 15% da média do módulo resiliente. A carga usada para ensaio deve ser equivalente a 30, 15 e 5% da RT medida a 25°C, para ensaios conduzidos a 5, 25 e 40°C, respectivamente.

Dois valores de módulos de resiliência devem ser obtidos. Um, a partir do deslocamento resiliente instantâneo horizontal e outro obtido a partir do deslocamento resiliente total horizontal, conforme ilustrado na Figura 2.22 *a*. A regressão linear 1 é essencialmente uma extensão da porção linear da reta de descarregamento, e abrange todos os pontos entre o pico de deslocamento até ao ponto equivalente a 75% do retorno do deslocamento resiliente total. A segunda regressão é baseada em todos os pontos dos últimos 0,75s de um pulso. O deslocamento resiliente total é obtido pela diferença entre o máximo deslocamento e a média de todos os pontos dos últimos 75% do ciclo.

As equações para determinação do MR e do v são aquelas descritas nas equações 2.25 e 2.26, respectivamente. Dois coeficientes de Poisson (resiliente total e resiliente instantâneo) também devem ser determinados, devendo estar ambos entre $0,10 < v < 0,50$, caso contrário estes limites devem ser assumidos como máximo e mínimo, para cálculo do MR.

2.4.3 Protocolo LTPP P07

Este protocolo foi preparado inicialmente em 1992 pelo Programa SHRP/LTPP. A versão disponível, entretanto, é a versão 1.1 de agosto de 2001. Pode ser considerado um procedimento de ensaio de alto nível de detalhamento. Estão citadas neste trabalho somente as recomendações feitas pelo protocolo referente ao ensaio de MR em misturas asfálticas.

As questões referentes a equipamento, temperaturas de ensaio e forma de pulso de carga são idênticas àquelas preconizadas pela norma da AASHTO TP-31-96, a exceção da especificação da frequência de aquisição de dados, sugerindo um sistema que disponha de uma taxa de amostragem igual a 500 pontos por segundo.

A determinação dos deslocamentos resilientes e o sistema de leitura de deslocamentos, entretanto, apresentam mudanças em relação aos modelos anteriormente apresentados. A Figura 2.22 *b* ilustra o algoritmo para determinação dos deslocamentos resilientes conforme preconizado pelo protocolo. Para cada ciclo, duas regressões lineares são usadas no cálculo do deslocamento resiliente instantâneo. A primeira, entre os pontos 5 e 17 após o pico de deslocamento; e a segunda nos últimos 299 pontos do ciclo, considerando uma taxa de amostragem de 500 pontos/s. Colocando estes índices numa referência temporal, têm-se os limites apresentados na Tabela 2.3.

Em relação ao sistema de leitura de deslocamentos, o Protocolo P07 sugere que seja utilizada a metodologia proposta por Roque e Buttlar (1992), cuja medição deve ser feita por LVDTs colados às duas faces do corpo-de-prova ao longo dos diâmetros vertical e horizontal, com distância de meio raio entre os pontos. O equacionamento tanto do cálculo do MR quanto do v (limitado ao intervalo $0,10 < v < 0,50$) está contemplado na metodologia selecionada que prevê para estes cálculos uma correção embutida do abaulamento gerado durante o ensaio. O protocolo sugere, ainda, o uso do software MRFHWA para que este cálculo seja efetuado; entretanto, de acordo com o FHWA, o mesmo não se encontra mais em distribuição.

É mencionado, na versão consultada do protocolo, que a carga a ser usada no ensaio deve ser aquela necessária para manter os deslocamentos horizontais entre 0,038 e 0,089mm. Entretanto, considerando-se um corpo-de-prova com MR de 5000MPa e RT de 1,5MPa, para fins de exemplo, para que se tenha um deslocamento horizontal de 0,038mm, seria necessária uma carga de 140% da resistência à tração do corpo-de-prova, o que leva a crer que há uma inconsistência no registro do texto.

2.4.4 Pesquisa 1-28A do NCHRP

A pesquisa 1-28A, o procedimento de ensaio sugerido para determinação de MR em misturas asfálticas mais atual, data de janeiro de 2004. É continuação dos trabalhos iniciados por Barksdale *et al.* (1997) com a publicação do Web Doc 14 – Pesquisa 1-28 do NCHRP. Tem por objetivo homogeneizar os procedimentos propostos pela Pesquisa 1-28, a norma existente AASHTO TP-31 e o método do FHWA – SHRP/LTPP Protocolo P07. É um procedimento de alto grau de detalhamento.

Os requisitos de equipamento são aqueles mesmos descritos pela AASHTO-TP31. A temperatura de ensaio preconizada é a de 25°C. A frequência de aquisição de dados do sistema, que deve ser capaz de promover informações de deslocamento e carga em tempo real, deve ser capaz de realizar 200 leituras por segundo dos transdutores de deslocamento e carga. O algoritmo proposto é aquele apresentado na Figura 2.22 *c*, que está discutido em detalhe no item 3.3 deste trabalho.

O sistema de medição de deslocamentos deve ser semelhante aquele utilizado pelo Protocolo P07, com LVDTs colados às faces do corpo-de-prova. Entretanto, a distância entre os pontos de apoio dos sensores vertical e horizontal deve ser de meio diâmetro. Não é feita referência a correções pelo efeito de abaulamento do corpo-de-prova.

A carga utilizada no ensaio deve ser de 15% do valor da RT medido a 25°C e está previsto que o corpo-de-prova seja ensaiado em dois eixos, com diferença de 90° entre eles. Um número mínimo de 100 pulsos deve ser aplicado para um pré-condicionamento do corpo-de-prova. O pulso de carga deve ser do tipo semi-seno-verso e com período de aplicação de carga de 0,1s. O ensaio deve ser realizado a frequência de 1Hz. O cálculo do MR e do coeficiente de

Poisson, limitado ao intervalo de $0,25 < \nu < 0,45$, devem ser feitos de acordo com as equações 2.33 e 2.34, respectivamente.

$$MR = \frac{P_{cicl}}{\Delta_h \cdot t} (0,2339 + 0,7801\nu) \quad (2.33)$$

$$\nu = \frac{-1,0695 - 0,2339 \frac{\Delta_v}{\Delta_h}}{0,3074 + 0,7801 \frac{\Delta_v}{\Delta_h}} \quad (2.34)$$

Onde:

Δ_v = deslocamento resiliente vertical medido entre dois pontos distantes o equivalente a $\frac{1}{2}$ diâmetro do corpo-de-prova.¹⁶

Δ_h = deslocamento resiliente horizontal medido entre dois pontos distantes o equivalente a $\frac{1}{2}$ diâmetro do corpo-de-prova.

2.4.5 Norma europeia NF EN 12697-26 / 2004

Com a criação da União Europeia, as normas de ensaio dos países participantes passaram a ser unificadas. Apesar deste processo ainda não estar completo a norma referente aos ensaios de módulo de rigidez, na qual se insere a de módulo de resiliência, já se apresenta sob forma de norma europeia, prevalecendo também sobre a norma britânica BSI DD-213-93. A norma NF EN 12697-26 pode ser considerada uma norma de médio grau de detalhamento em comparação com as outras referenciadas neste estudo.

Aparentemente, esta norma possui forte influência da norma britânica BSI DD-213, com várias diferenças para as normas americanas citadas anteriormente. As temperaturas de ensaio recomendadas são de 2°, 10° e 20°C. As medidas de deslocamentos horizontais deverão ser efetuadas com auxílio de LVDTs presos aos corpos-de-prova por meio de sistema de

¹⁶ Parece haver um equívoco na definição de Δ_v . No documento original do NCHRP 285/2004 – Pesquisa 1-28A, a definição referente à fórmula do coeficiente de Poisson diz estar preparada para uma distância entre os pontos de medição igual a $\frac{3}{4}$ do diâmetro do corpo-de-prova, enquanto a fórmula apresentada está, corretamente, preparada para um posicionamento dos sensores igual a $\frac{1}{2}$ diâmetro do corpo-de-prova, como é preconizado no documento.

posicionamento como o indicado pela norma da ASTM D-4123 e não há menção a medidas de deslocamentos verticais. O sistema de aquisição de dados deve registrar um mínimo de 500 pontos/segundo em cada sensor (deslocamento e carga).

O pulso de carga indicado para ensaio é o mesmo apresentado na Figura 2.17. Como ilustra a figura o tempo de carregamento é definido pelo tempo de elevação da carga no pulso, padronizado em $0,124 \pm 0,004s$. A carga aplicada é selecionada de forma a gerar um deslocamento horizontal de $7 \pm 2\mu m$ para corpos-de-prova de 150mm de diâmetro ou $5 \pm 2\mu m$ para corpos-de-prova de 100mm de diâmetro.

Deve-se executar o ensaio em dois eixos do corpo-de-prova, com o segundo eixo a 90° de diferença do primeiro. Um mínimo de 10 pulsos devem ser aplicados com pré-condicionamento, seguidos de cinco pulsos para determinação do módulo. Não há algoritmo de cálculo elaborado para determinação do deslocamento elástico, apenas uma recomendação gráfica que sugere a subtração do ponto de máximo pelo ponto de mínimo de cada pulso para determinação deste deslocamento. O coeficiente de Poisson, se não determinado, deve ser considerado 0,35 para todas as temperaturas.

O cálculo do módulo de rigidez, como é denominado pela norma, é também feito pela equação 2.25. Há ainda uma correção a ser feita em função do fator de superfície da carga medida, como mostra a equação 2.35.

$$S'_m = S_m \times (1 - 0,322 \times (\log(S_m) - 1,82) \times (0,60 - k)) \quad (2.35)$$

Onde:

S'_m = módulo de rigidez, expresso em MPa, corrigido por um fator de superfície de carga de 0,60

k = fator de superfície de carga medido

S_m = módulo de rigidez, expresso em MPa, à um fator de carga k , expresso em graus celsius ($^\circ C$).

2.4.6 Norma australiana AS 2891.13.1

Datada de 1995 esta norma apresenta algumas semelhanças com as normas apresentadas anteriormente, porém com outros aspectos singulares. Pode ser considerada com um grau de detalhamento acerca do procedimento de ensaio de nível médio.

O equipamento especificado para ensaio deve ser um sistema pneumático ou hidráulico capaz de aplicar cargas com formato triangular ou do tipo semi-seno-verso. O pulso de carga deve ter um tempo de elevação da carga no pulso (definido como sendo o tempo necessário para que a carga seja elevada de 10 para 90% do pico de carga) de 0,04s e período de descanso (10% a 10%) de 3s para que resulte em valores no padrão de referência.

A Figura 2.27 ilustra o esquema de determinação dos tempos de elevação e descanso. Salienta-se que para um pulso de carga do tipo semi-seno-verso, com período de carregamento de 0,1s, o tempo para que a carga seja elevada de 10 para 90% é de aproximadamente 0,03s.

Ainda na Figura 2.27 pode se verificar como deve se proceder à medida do deslocamento horizontal; não consta na norma qualquer algoritmo elaborado para determinação do mesmo. A carga a ser aplicada deve ser aquela que ocasione no corpo-de-prova uma deformação recuperável de $50 \pm 20 \mu S$ que, para corpos-de-prova de 101,6mm de diâmetro, corresponde a um deslocamento de $5 \pm 2 \mu m$.

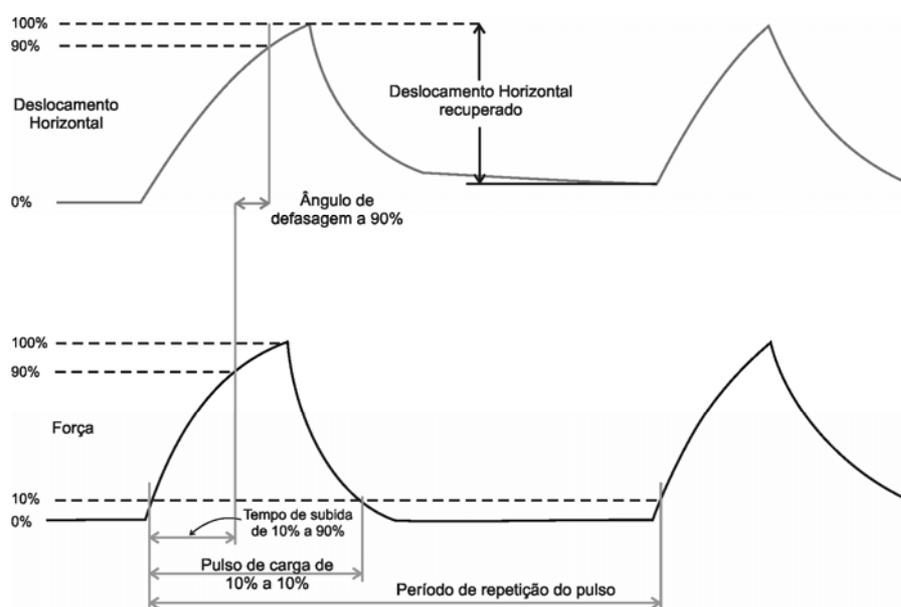


Figura 2.27 – Forma de pulsos de deslocamento e carga de acordo com AS 2891.13.1
Fonte: Norma Australiana AS2891.13.1

A temperatura de ensaio recomendada é de 25°C. O sensor preconizado pela norma para leitura dos deslocamentos é do tipo extensômetro a ser montado em um dispositivo capaz de ficar em contato com o corpo-de-prova durante todo o ensaio.

O número de pulsos de pré-condicionamento é de no mínimo cinco pulsos, seguidos por mais cinco pulsos para determinação do MR. O equacionamento do cálculo do MR segue também a equação 2.25.

2.4.7 Norma DNER 133/94

Esta norma teve sua primeira publicação em 1986, tendo sido revista apenas quanto à forma em 1994, permanecendo o conteúdo inalterado. No Brasil, permanece até hoje como norma de referência aos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral para misturas asfálticas. Pode ser considerada uma norma de baixo nível de detalhamento.

A norma preconiza o uso de um sistema pneumático de carregamento com dispositivo mecânico de controle de aplicação de carga. O tipo de sensor de deslocamento a ser utilizado é do tipo LVDT, preso ao corpo-de-prova por meio de um suporte como aquele descrito pela norma ASTM D-4123.

Recomenda-se utilizar a menor carga possível capaz de fornecer um registro mensurável com período de aplicação de carga de 0,1s à frequência de 1Hz. O cálculo do módulo segue a equação 2.16, apresentada anteriormente neste trabalho.

O coeficiente de Poisson sugerido é de 0,30 (para temperatura de 30°C). O número de ciclos de pré-condicionamento deve ser de 300 pulsos e a determinação do MR nos próximos três grupos de 100 ciclos. A temperatura de referência do ensaio é de 30°C.

3. EQUIPAMENTO, MÉTODOS E MATERIAIS UTILIZADOS

Nesta pesquisa foi realizada uma análise paramétrica do ensaio para determinação do módulo de resiliência sob compressão diametral, empregando-se corpos-de-prova Marshall (101,6mm de diâmetro) de duas misturas asfálticas: concreto asfáltico com ligante asfáltico convencional tipo CAP-20 (CA-C) e concreto asfáltico com ligante asfáltico modificado por adição de borracha tipo Ecoflex-B (CA-AB). Para viabilizar este estudo, houve necessidade da adaptação do equipamento existente no Laboratório de Pavimentação (LPAV) da UFRGS e do sistema de posicionamento de LVDTs para medição tanto dos deslocamentos horizontais quanto verticais, viabilizando a determinação do coeficiente de Poisson.

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1.1 Efeitos e níveis avaliados

Dos vários efeitos que influenciam a determinação do módulo de resiliência, discutidos em detalhe no capítulo 2, foram selecionados sete deles para avaliação nesta pesquisa. Tanto os efeitos quanto os níveis de avaliação selecionados para estudo, descritos abaixo, seguiram critérios técnicos e/ou práticos.

- Efeito do tempo do pulso de carga, em 3 níveis: 0,10s, 0,15s e 0,20s.
- Efeito da frequência de ensaio, em 3 níveis: 1Hz, 3Hz e 5Hz.
- Efeito da intensidade de carga utilizado no ensaio, em três níveis: 10%, 15% e 25% da RT, para os ensaios a 10°C; 15%, 30% e 40% da RT para os ensaios a 25°C e 35°C.
- Efeito da forma do pulso de carga para o tempo de pulso de carga de 0,20s em 2 níveis: Forma 1 e Forma 2.
- Efeito da análise matemática dos deslocamentos resilientes em 2 níveis: Análise propostas pela AASHTO TP31-96, análise proposta pelo Protocolo P07 e análise proposta pela pesquisa NCHRP 1-28/1-28A.

- Efeito do número de ciclos, investigado durante a vida de fadiga com a determinação do MR até a ruptura do corpo-de-prova à temperatura de 25 °C.
- Efeito da temperatura de ensaio, em 3 níveis: 10°C, 25°C e 35°C.

a) Escolha dos níveis de tempo de pulso de carga

A partir das pesquisas realizadas e das normas existentes, evidenciou-se que o pulso de carga mais adequado e também selecionado pela maioria das normas, conforme descrito no item 2.4, é o tipo semi-seno-verso (*haversine*) com duração de 0,1s. Considerou-se este como sendo o padrão de referência.

Para os ensaios realizados, foram escolhidos os níveis de 0,10s, 0,15s e 0,20s. A opção dos níveis adicionais serem todos maiores do que o de referência deve-se à restrição do equipamento pneumático disposto que inviabilizou ensaios com períodos de aplicação de carga menores do que 0,075s, cujo valor acreditou-se não se distanciar suficientemente da referência.

Sabe-se, também, que por questões técnicas com equipamentos pneumáticos, muitas vezes há dificuldades em manter o período do pulso de carga no valor de 0,1s, normalmente resultando em um aumento deste período, conforme relatado no item 3.2.3. Levou-se em consideração para escolha dos níveis adicionais, ainda, o fato de tanto a norma ASTM D4123 quanto a norma europeia recomendarem tempos de aplicação de carga superiores a 0,1s.

Desta forma optou-se pelos níveis citados de modo a não se distanciar muito do valor de referência e que estivessem também dentro do intervalo de valores existentes na literatura nacional e internacional que relata valores entre 0,03s e 0,40s.

b) Escolha dos níveis de frequência de ensaio

A frequência de 1Hz já se encontra consolidada na literatura como referência para os ensaios de MR. Com a seleção adicional de níveis de frequência de ensaio de 3Hz e 5Hz buscou-se a viabilização de pesquisas em conjunto sobre o efeito viscoelástico das misturas. Este efeito fica mais evidente em carregamentos cujos períodos de descanso sejam menores.

Fazem-se especulações neste trabalho de que a defasagem medida no ensaio de MR, entre o pulso de deslocamento e o pulso de carga, pode estar correlacionada com a medição do

ângulo de fase determinado no ensaio de módulo complexo. Para que fosse possível proceder a esta verificação, houve a necessidade de fazer ensaios a frequências mais elevadas.

Apesar de o equipamento disponível no LAPAV ser capaz de aplicar frequências de até 10Hz, verificou-se nestes que a deformação permanente é muito elevada e a interpretação do deslocamento resiliente, a partir dos algoritmos analisados, é inviável. Optou-se, desta forma, por analisar a frequência padrão de 1Hz e as frequências adicionais de 3Hz e 5Hz.

c) Escolha dos níveis de carga

Sabe-se que a aplicação da teoria da elasticidade a misturas asfálticas só é admissível a níveis baixos de tensão, consensualmente abaixo de 50% da tensão de tração de ruptura. Há, entretanto, uma dispersão sobre qual tensão considerar para cálculo da carga a ser utilizado no ensaio de MR – varia entre 10% a 50% da RT.

Alguns procedimentos de ensaio norteiam esta questão delimitando o deslocamento que deve ser gerado durante o ensaio ao invés da carga; a norma europeia EN 12697-25/2005 e a norma australiana AS 2891.13.1/1995, por exemplo, limitam o deslocamento horizontal em $0,005\pm 0,002$ mm, o que, para um corpo-de-prova com MR de 5000MPa e RT de 1,5MPa, por exemplo, corresponderia a fazer um ensaio com aproximadamente 18% da RT.

Optou-se, assim, por referenciar a carga de ensaio na RT característica da mistura, padronizando em 15% deste valor, bem como estudar o efeito do nível de carga no valor do MR, nos percentuais mais elevados de RT, 30% e 40%, que está dentro do limite contemplado pelas normas consultadas.

Por questões de restrição de equipamento, como não foi possível a realização dos ensaios de MR a 40% da RT nas temperaturas de 10°C, dado a elevada carga necessária – maior que 10 kN, optou-se por realizar estes ensaios nos níveis de 10%, 15% e 20% da RT.

d) Escolha dos tipos de forma de pulso de carga

O equipamento utilizado não possui um gerador de forma de onda. Dada a complexidade de se construir um sistema capaz de variar a forma do pulso, função do tipo de onda elétrica e das características mecânicas do equipamento, optou-se por fazer um estudo apenas com as formas de onda disponíveis: a forma de semi-seno-verso e uma forma próxima de uma onda quadrada, possível de ser obtida com a admissão de um maior volume de ar, para um mesmo

tempo de abertura da válvula solenóide, o que faz com que a carga fique aplicada por um período maior de tempo. Esta segunda forma testada, foi escolhida por questões operacionais, cuja execução pode ser considerada de baixo grau de dificuldade.

A Figura 3.1 ilustra os pulsos de carga testados. Salienta-se, no entanto, como será descrito em detalhe no item 3.2.3, que só é possível obter o pulso chamado “Forma 2” para tempos de pulso de carga maiores do que 0,15s. Como o maior pulso de carga de interesse era de 0,2s, apenas nesta condição houve a possibilidade de se analisar a influência da forma do pulso de carga no valor do MR.

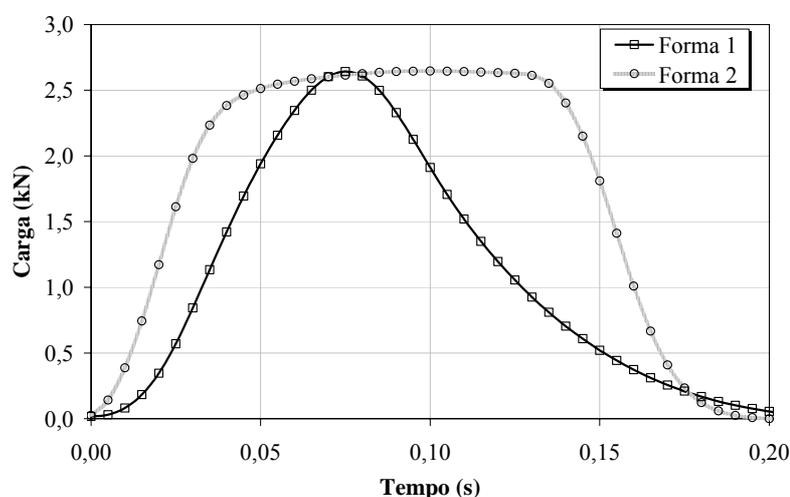


Figura 3.1 – Forma dos pulsos de carga usados nos ensaios com período de carregamento de 0,2s

e) Efeito da análise matemática dos deslocamentos resilientes

Conforme foi constatado no item 2.3.1.3, com a Figura 2.22 *d*, há uma considerável variação no cálculo do deslocamento resiliente em função do algoritmo de cálculo utilizado. Esta variação é diretamente proporcional à variação que causará no cálculo do MR. Para que se pudesse, então, melhor avaliar este efeito na variação do MR, selecionaram-se os três algoritmos apresentados, AASHTO TP31-96, Protocolo P07 e Pesquisa NCHRP 1-28/1-28A para verificação.

f) Efeito do número de ciclos

O efeito do número de ciclos no valor do MR foi analisado durante o ensaio de vida de fadiga a tensão controlada. Devido à duração dos ensaios, optou-se por fazê-los a apenas uma temperatura, no caso 25°C.

g) Efeito da temperatura de ensaio

Apesar de se conhecer o efeito da temperatura no valor de MR, buscou-se com a realização dos ensaios a 10, 25 e 35°C, quantificá-lo quando da variação dos outros efeitos analisados: pulso de carga, frequência de ensaio, intensidade de carga, forma do pulso de carga e análise matemática. Devido às características termo-sensíveis das misturas asfálticas, dado o comportamento viscoelástico das mesmas, estes efeitos podem ser de diferentes ordens dependendo da temperatura em que são analisados.

A temperatura de 25°C é corrente nos procedimentos de ensaio de RT e MR usados atualmente no país, sendo, portanto, uma importante referência para análise. A temperatura de 35°C foi uma escolha conservadora para que não se extrapolasse os limites de validade das teorias de elasticidade aplicadas na determinação do MR, conforme prevê Pinto *et al.* (1981).

A temperatura de 10°C foi escolhida devido a que abaixo desta temperatura a rigidez do material faz com que as cargas necessárias nos ensaios de MR, RT e fadiga sejam muito elevadas, necessitando-se para tanto, significativa reestruturação dos equipamentos existentes. Como raramente se tem interesse em dados de MR abaixo desta temperatura, dadas as condições climáticas nacionais, não se justifica tal reestruturação.

3.1.2 Matriz experimental

A matriz experimental desta pesquisa contou com 8 configurações do ensaio de MR por temperatura para cada material analisado, ensaio de RT em três temperaturas e ensaios de fadiga em uma temperatura, totalizando 56 ensaios a partir de 140 corpos-de-prova. Alguns corpos-de-prova foram re-ensaiados com a intenção de reduzir o número total de corpos-de-prova moldados. A Tabela 3.1 apresenta a matriz dos experimentos realizados nesta pesquisa.

Os ensaios que utilizaram o mesmo corpo-de-prova na sua realização foram:

- Ensaios de MR (1Hz; 0,10s de pulso de carga; 15%RT) – seguidos do ensaio de MR (1Hz; 0,10s de pulso de carga; 40%RT)
- Ensaio de MR (1Hz; 0,20s de pulso de carga; 15%RT) – Forma de pulso1, seguido do ensaio de MR (1Hz; 0,20s de pulso de carga; 15%RT) – Forma de pulso2.

Tabela 3.1 – Matriz de experimentos realizados na pesquisa

| | | | | |
|----------------------------|---------------------|------|-------------------------|-----------------------|
| CA - CAP20 | Ensaio de RT | 10°C | | |
| | | 25°C | | |
| | | 35°C | | |
| | Ensaio de MR | 10°C | Frequência | 1Hz, 3Hz e 5Hz |
| | | | Pulso de carga | 0,10s; 0,15s; 0,20s |
| | | | Carga de ensaio | 10%*, 15%, 20% RT10°C |
| | | | Forma do pulso de carga | Forma 1 e Forma 2** |
| | | 25°C | Frequência | 1Hz, 3Hz e 5Hz |
| | | | Pulso de carga | 0,10s; 0,15s; 0,20s |
| | | | Carga de ensaio | 15%, 30%, 40%* RT25°C |
| | | | Forma do pulso de carga | Forma 1 e Forma 2** |
| | | 35°C | Frequência | 1Hz, 3Hz e 5Hz |
| | | | Pulso de carga | 0,10s; 0,15s; 0,20s |
| | | | Carga de ensaio | 15%, 30%, 40% RT35°C |
| Forma do pulso de carga | | | Forma 1 e Forma 2** | |
| Ensaio de Fadiga TC | 25°C | | | |
| CA - Ecoflex B | Ensaio de RT | 10°C | | |
| | | 25°C | | |
| | | 35°C | | |
| | Ensaio de MR | 10°C | Frequência | 1Hz, 3Hz e 5Hz |
| | | | Pulso de carga | 0,10s; 0,15s; 0,20s |
| | | | Carga de ensaio | 10%*, 15%, 20% RT10°C |
| | | | Forma do pulso de carga | Forma 1 e Forma 2** |
| | | 25°C | Frequência | 1Hz, 3Hz e 5Hz |
| | | | Pulso de carga | 0,10s; 0,15s; 0,20s |
| | | | Carga de ensaio | 15%, 30%, 40%* RT25°C |
| | | | Forma do pulso de carga | Forma 1 e Forma 2** |
| | | 35°C | Frequência | 1Hz, 3Hz e 5Hz |
| | | | Pulso de carga | 0,10s; 0,15s; 0,20s |
| | | | Carga de ensaio | 15%, 30%, 40% RT35°C |
| Forma do pulso de carga | | | Forma 1 e Forma 2** | |
| Ensaio de Fadiga TC | 25°C | | | |

Não foram avaliados os efeitos cruzados entre os parâmetros analisados pelo fato de se ter interesse em se conhecer apenas a magnitude da variação do módulo como função de cada efeito pesquisado.

No Anexo A, encontram-se as planilhas de ensaios com os detalhes de todos os testes executados e dos corpos-de-prova utilizados em cada um.

3.2 EQUIPAMENTO UTILIZADO

Para viabilizar este estudo, foi necessária a adaptação do equipamento existente no Laboratório de Pavimentação da UFRGS. Desta forma foi possível enquadrar o equipamento dentro dos padrões das normas internacionais, viabilizando desta forma a análise paramétrica proposta.

Foram incorporadas ao sistema uma série de características adicionais de modo a conferir maior confiabilidade nas leituras e facilidades na análise paramétrica executada, a saber:

- Portabilidade do sistema – facilidade de instalação do equipamento em qualquer computador do tipo PC, viabilizando o uso inclusive em computadores portáteis, facilitando a calibração dos sensores no próprio sistema de condicionamento, principalmente os sensores de carga, em prensas calibradas existentes em laboratórios especializados.
- Sistema de controle digital – independente de componentes analógicos, o sistema de atuadores (solenóide e válvulas proporcionais), controlado via programa de computador, bem como transdutores de deslocamento, carga e temperatura ficam menos suscetíveis à variação da temperatura ambiente, mantendo as calibrações do equipamento consideravelmente mais estáveis por períodos de tempo mais prolongados. Outro importante benefício com o sistema de controle digital é o tempo de resposta que se obtém, bastante mais baixo do que em sistemas de controle analógicos. Isto foi bastante importante para a consideração da defasagem existente entre o pulso de carga e o pulso de deslocamento no ensaio de MR.
- Software de controle com características especiais – controle da frequência de ensaio, duração do pulso de carga, ciclos de condicionamento, número de pulsos gravado para determinação do MR, percentual de RT utilizado no ensaio, pós-análise de resultados, fórmula do cálculo de MR ajustável e dois algoritmos matemáticos implementados para determinação do cálculo dos deslocamentos resilientes (segundo o Protocolo P07 do LTPP e também segundo a Pesquisa 1-28 e 1-28A do NCHRP) com as variáveis do algoritmo abertas para definição.
- Dois estágios de ganho para os sensores de deslocamento – aumento da relação sinal/ruído no nível de ganho mais alto para os deslocamentos pequenos como aqueles obtidos no ensaio de MR em misturas asfálticas, através da redução da zona sensível

do LVDT na proporção 1:10 (estágio de ganho mínimo: 100% do curso do LVDT em uso; estágio de ganho máximo: 10% do curso do LVDT em uso).

O sistema utiliza uma interface serial de comunicação, conversores AD e DA de 16bits, micro controlador tipo CMOS e taxa de aquisição de 200Hz/canal. Possui dois canais de controle (uma válvula proporcional para controle de tensão desviadora e outra para controle da tensão confinante), seis canais de leitura (2 LVDTs, 1 sensor de temperatura, 1 temporizador externo, 1 célula de carga e 1 transdutor de pressão) e controle de uma válvula solenóide.

A Figura 3.2 apresenta o sistema de ensaio de módulo de resiliência para misturas asfálticas do LAPAV/UFRGS – SEEPAV 8200, com detalhes do sistema de aquisição e controle e também do sistema de carregamento. O programa de controle tem interface visual programada em Borland© C++ Builder 6, cuja interface é bastante amigável, facilitando a operação de ensaio e reduzindo a variabilidade do valor de MR pela interferência do operador. A Figura 3.3 mostra a tela principal de ensaio.



Figura 3.2 – Equipamento de ensaio de MR para misturas asfálticas do LAPAV/UFRGS

O Anexo B apresenta o algoritmo de cálculo utilizado no programa para determinação dos deslocamentos resiliente segundo a proposição da pesquisa NCHRP 1-28 e 1-28A, bem como um memorial passo a passo das rotinas executadas através de um cálculo feito manualmente.

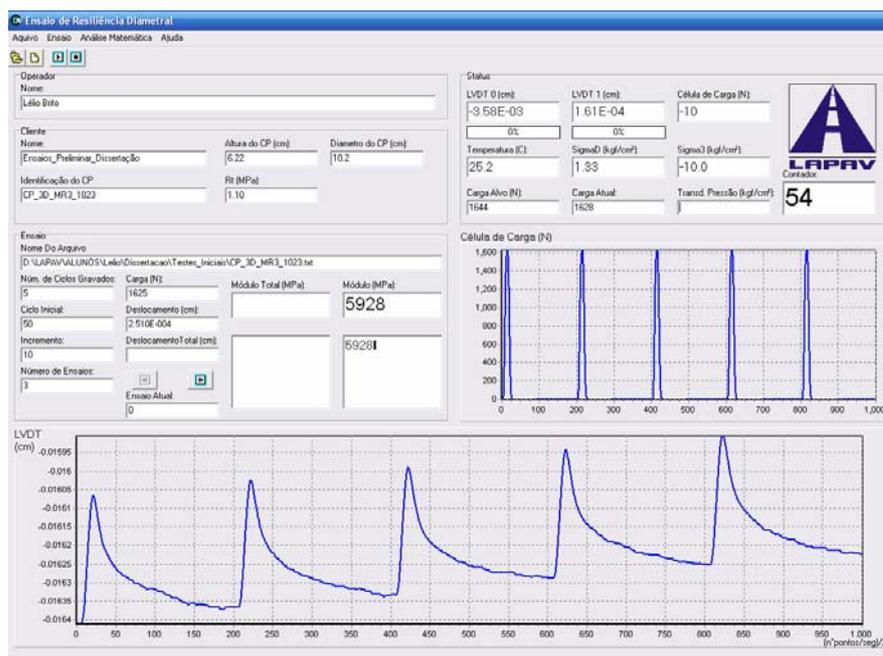


Figura 3.3 – Programa de Controle do ensaio de MR e detalhes das telas de configurações

Outras questões importantes no desenvolvimento do novo sistema de aquisição de dados para o ensaio de MR foram a relação sinal/ruído e o tempo de resposta do sistema. Como foi apresentado no item 2.3.1.3g, dependendo da relação sinal/ruído obtido no equipamento em uso, pode haver variações no valor de MR em função do algoritmo de cálculo utilizado para determinação do deslocamento resiliente. A Figura 3.4 ilustra uma série de cinco pulsos de deslocamento medidos no sistema novo, concebido para esta dissertação, e o sistema antigo existentes no LAPAV, ambos a partir de um mesmo corpo-de-prova.

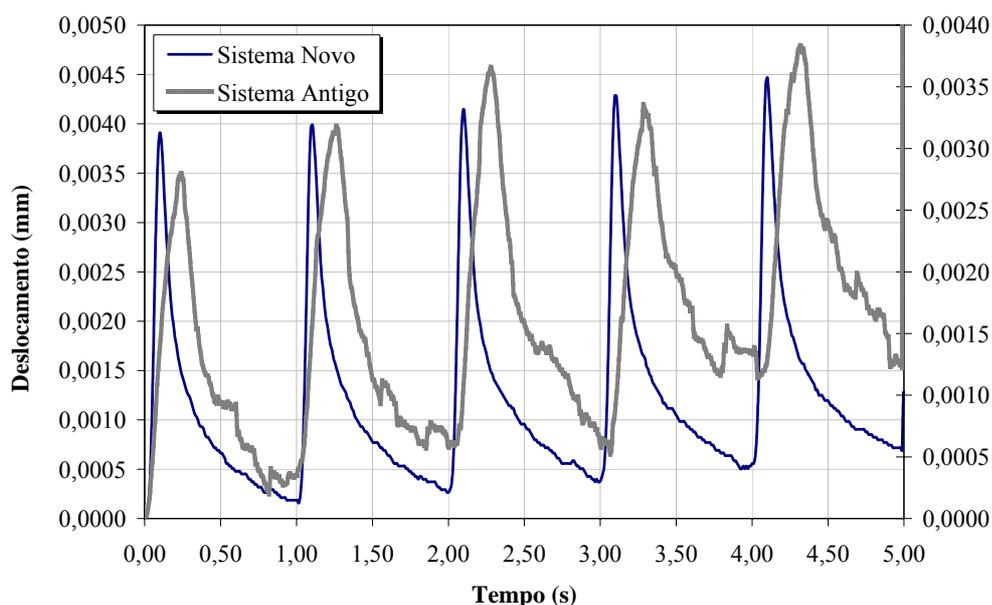


Figura 3.4 – Comparação entre os sinais de deslocamento obtido no sistema novo e no antigo

Nota-se que o ruído no sistema antigo é razoavelmente maior do que o do novo sistema. A repetibilidade de leitura também melhorou e o tempo de reposta do sistema antigo também se evidencia como sendo maior do que o do novo sistema, o que certamente também afeta o cálculo do deslocamento resiliente nos algoritmos que utilizam os limites das retas de regressão em função do tempo de carregamento (naqueles que as retas são relativas ao pico de deslocamento, há pouco efeito do retardo do sistema, desde que este não exceda certos limites).

3.2.1 Pórtico de carregamento

Para atender a um dos objetivos específicos deste trabalho, que foi medir o coeficiente de Poisson nos ensaios realizados, fez-se necessário a adoção de um sistema de posicionamento de LVDTs, diferente daquele utilizado correntemente no LAPAV.

Algumas alterações, entretanto, se fizeram necessárias neste pórtico de carregamento para a realização de alguns estudos preliminares e também para a realização de ensaios de outros estudos. Apesar de este não ter sido o dispositivo de carregamento utilizado, relatam-se estas alterações por terem sido de suma importância no entendimento de algumas das variáveis.

Barksdale *et al.* (1997) relatam que o atrito e a inércia dos dispositivos de carregamento podem alterar o resultado de MR, uma vez que a perda de carga nas buchas de contato, ou os contra-pesos utilizados em alguns sistemas mais antigos de posicionamento, não são computados pela célula de carga posicionada imediatamente no topo do dispositivo.

Para verificação desta questão, procedeu-se a um simples teste: posicionou-se uma célula de carga A sob o pórtico de carregamento na posição ocupada pelo corpo-de-prova durante um ensaio de MR; com o monitoramento da célula de carga B, posicionada sobre a base superior do suporte de carregamento, procedeu-se a comparação da perda de carga pela ação de buchas-guia sem rolamento, numa primeira situação, e pela ação dos rolamentos lineares, numa segunda situação, sobre carregamentos cíclicos de magnitude crescente. O objetivo foi verificar se há perda em ambos os casos e quantificá-las caso haja. A Figura 3.5 ilustra os resultados obtidos.

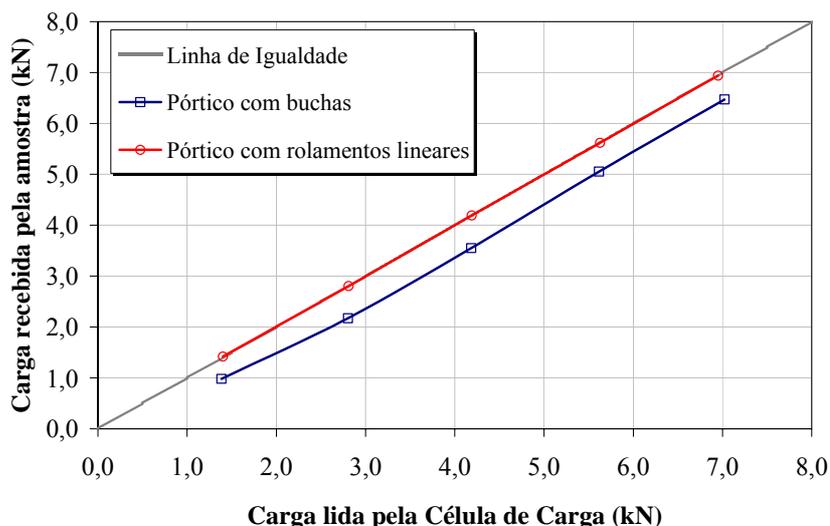


Figura 3.5 – Perda de carga por atrito no pórtico de carregamento

Percebe-se, pela análise dos resultados obtidos, que há perda por atrito apenas no pórtico com buchas. Esta perda parece ter pouca dependência do nível de carga aplicada; a diferença entre a carga aplicada e a carga recebida pelo corpo-de-prova durante o ensaio, quando do uso do pórtico com buchas, variou de 0,40 a 0,63 kN.

Outro aspecto importante de se relatar é o fato de as buchas terem sido lubrificadas e o alinhamento com o eixo de carregamento verificado com precisão. Notou-se, ainda, que para pequenos desalinhamentos na aplicação da carga, a magnitude da perda por atrito aumenta rapidamente.

Verificou-se, portanto, a necessidade de substituir as buchas do pórtico de carregamento do ensaio de MR do LAPAV por rolamentos lineares para evitar as perdas por atrito. Outra modificação executada foi a utilização de um parafuso de aproximação para correções, de forma a evitar variação do pulso de carga com a variação de volume de ar presente no cilindro pneumático, como é apresentado no item 3.2.3. Com ele é possível sempre manter o pistão de aplicação de carga devidamente posicionado. A Figura 3.6 apresenta o pórtico com as modificações e suas características.

Conforme mencionado anteriormente, este não foi, entretanto, o pórtico utilizado para os ensaios desta dissertação, uma vez que o vão livre entre as hastes guias não era suficiente para posicionamento do corpo-de-prova com o suporte de posicionamento de LVDTs – descrito no próximo item. A Figura 3.7 ilustra o pórtico utilizado, que por questões de tempo não pôde ser alterado e utilizou portanto, buchas nas hastes guias. Para correção da carga perdida por atrito,

procedeu-se a uma calibração e quando da determinação dos valores de MR, feito a devida correção do valor da carga. Note-se, ainda, que ao invés de utilizar um parafuso de aproximação, foi empregado um cilindro metálico de altura calibrada para facilitar o completo recuo do pistão de aplicação de carga, certificando-se desta forma que o volume de ar no cilindro pneumático fosse o menor possível durante os ensaios.

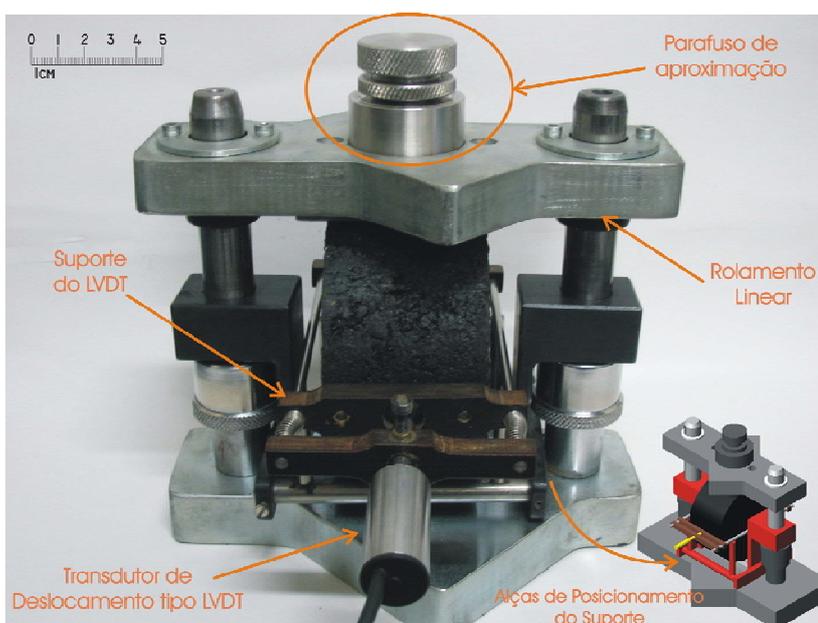


Figura 3.6 – Sistema de Posicionamento de LVDT – POLI/USP adaptado.

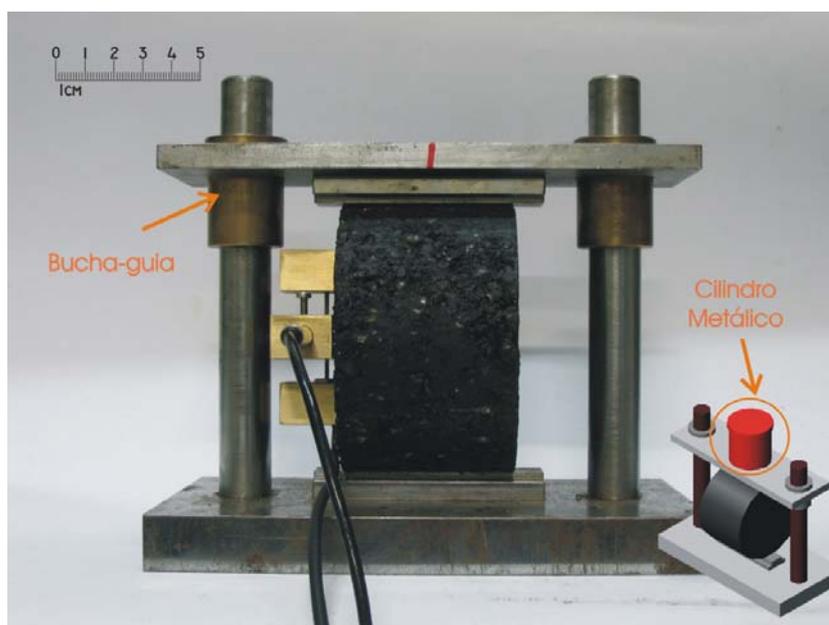


Figura 3.7 – Pórtico de carregamento utilizado nesta pesquisa

3.2.2 Sistema de posicionamento dos LVDTs

Para a determinação do coeficiente de Poisson, necessita-se de leituras de deslocamentos horizontais e verticais, o que não é realizado nos ensaios usuais de MR. Fez-se então necessário a proposição de um sistema de posicionamento de LVDTs para medição tanto dos deslocamentos horizontais quanto verticais.

Vários são os pesquisadores que sugerem que as medidas de deslocamentos verticais e horizontais sejam feitas através do uso de LVDTs presos às faces do corpo-de-prova através de pontos de apoio colados e centralizados; divergem, entretanto, entre o espaçamento que deve haver entre os pontos de medida.

Kim e Wen (2002) relatam que os pontos de apoio devem ficar a uma distância igual a $\frac{1}{2}$ diâmetro do corpo-de-prova. Roque e Buttlar (1992) sugerem que esta distância seja de $\frac{1}{4}$ do diâmetro. Barksdale *et al.* (1997), no Projeto 1-28 do NCHRP, propõem que este comprimento deva ser de $\frac{3}{4}$ do diâmetro do corpo-de-prova, enquanto o Projeto 1-28A do NCHRP (2004), preconiza um distanciamento de $\frac{1}{2}$ diâmetro entre os pontos de fixação dos sensores. A Figura 3.8 mostra exemplos de sensores presos às faces de corpos-de-prova de misturas asfálticas com distância entre os pontos de apoio de: (a) $\frac{1}{4}$ do diâmetro do corpo-de-prova, conforme proposição de Roque e Buttlar e (b) $\frac{1}{2}$ do diâmetro do corpo-de-prova, conforme proposto por Kim e Wen (2002) e preconizado pelo Projeto 1-28A do NCHRP

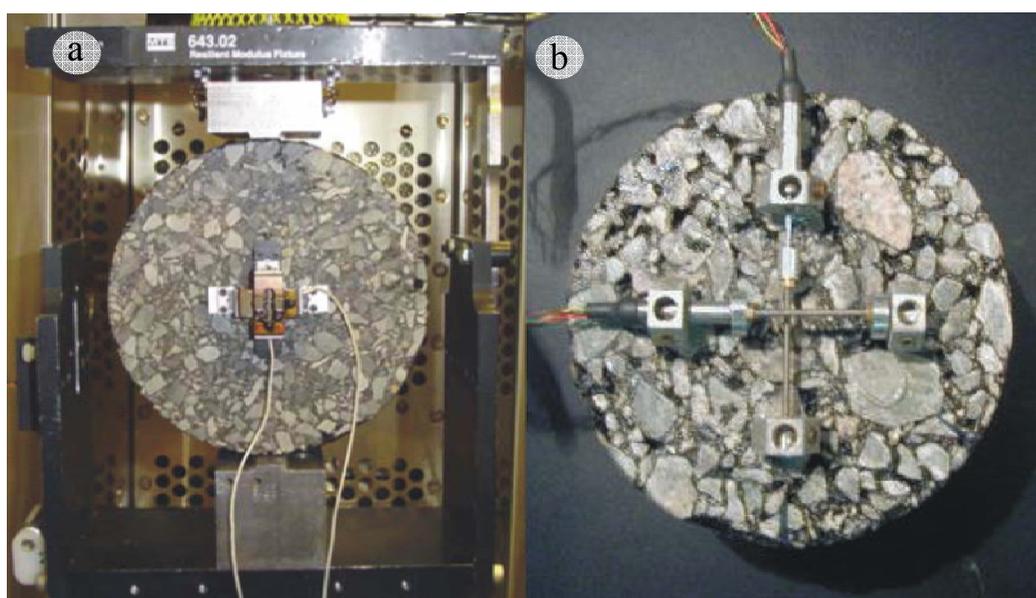


Figura 3.8 – Exemplo de posicionamento de sensores

Definiu-se a distância de posicionamento dos sensores como sendo de $\frac{1}{2}$ do diâmetro do corpo-de-prova; como todos os ensaios foram realizados em corpos-de-prova de 101,6mm de diâmetro, a distância de fixação dos LVDTs foi de 50,8mm. Esta escolha foi baseada no princípio do EVR, comentado no item 2.3.1.3 (f), que diz que a mínima taxa de tamanho máximo de agregado em relação ao espaçamento dos sensores deve ser de 1:3 ou 1:4. A análise do estado de tensões gerado no corpo-de-prova durante um carregamento, ilustrado na Figura 3.9, também contribuiu para esta escolha. Observa-se que com este distanciamento há pouca influência das tensões cisalhantes geradas junto aos frisos e também uma zona de homogeneidade na distribuição das tensões normais no eixo vertical e horizontal.

A análise apresentada na Figura 3.9 foi realizada com o programa Abaqus© 6.4. O tipo de elemento finito utilizado foi o quadrilátero composto por 8 nós, o que garante interpolação quadrática (não linear) para os deslocamentos, e conseqüentemente, para as sollicitações. O tamanho do elemento finito para a criação da malha foi da ordem de 0,5mm.

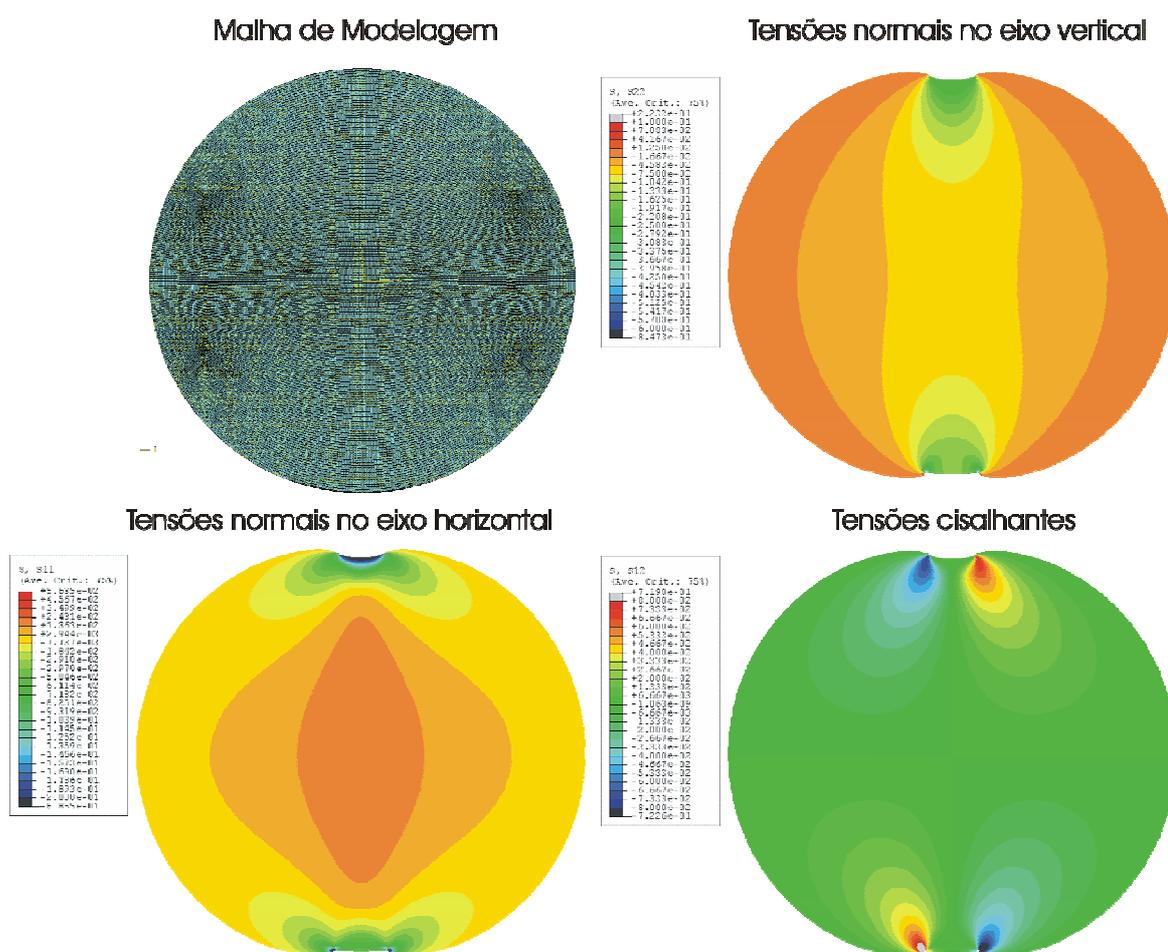


Figura 3.9 – Estado de tensões em corpos-de-prova cilíndricos durante o ensaio de MR

Para a fixação dos sensores na posição selecionada, concebeu-se um sistema de posicionamento dos LVDTs semelhante aquele apresentado por Kim e Wen (2002). Entretanto, devido às dimensões dos LVDTs disponíveis, algumas alterações em relação ao tamanho dos blocos de fixação tiveram de ser feitas, resultando em peças paralelepípedicas de tamanho 22x16x16mm, com furação adequada aos sensores utilizados, conforme apresentado na Figura 3.10. Para que a zona de contato fosse a menor possível, sem prejudicar a estabilidade das peças devido ao seu tamanho, reduziu-se a área de colagem para uma superfície circular com diâmetro de 10mm.

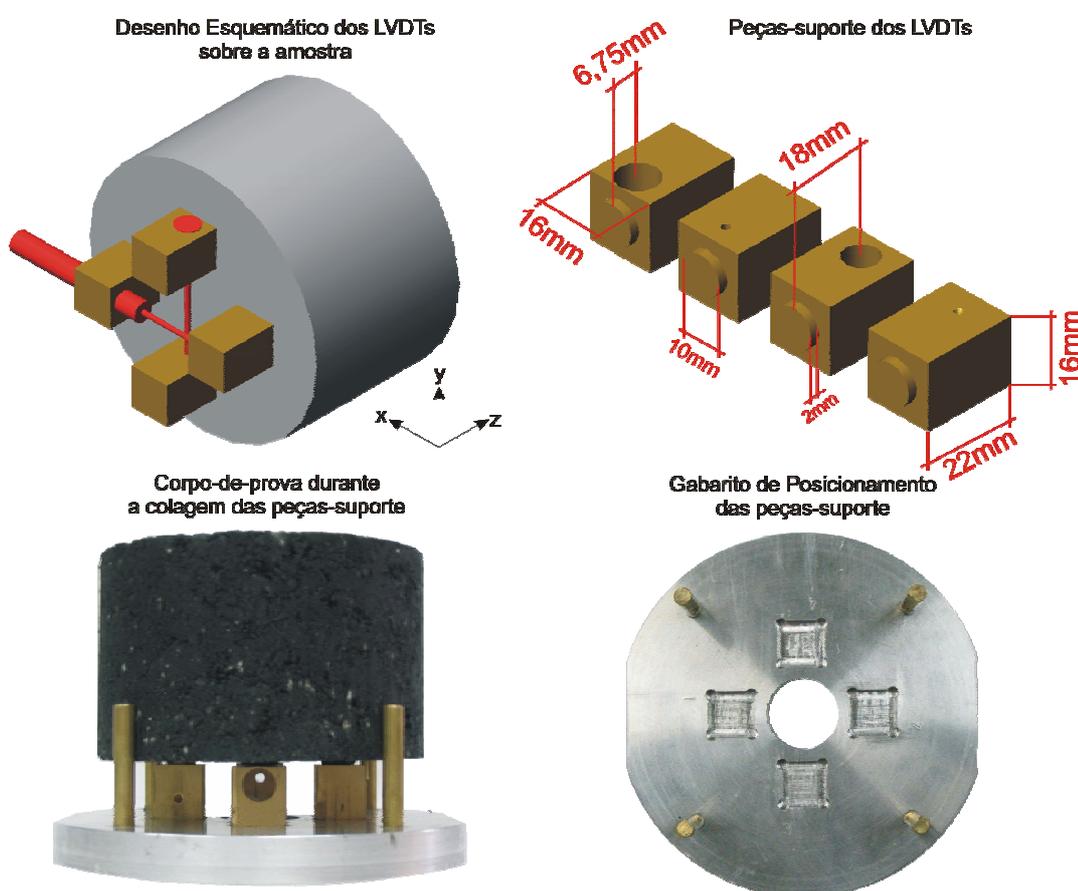


Figura 3.10 – Sistema de posicionamento de LVDTs concebido para a pesquisa

3.2.3 Calibração do pulso de carga

O pulso de carga, como foi discutido no capítulo 2, é um dos importantes parâmetros responsáveis pela variabilidade do valor do MR. Evidencia-se, desta forma, a necessidade de

calibrá-lo corretamente e também de criarem-se formas de bloquear sua variação durante os ensaios.

De uma maneira simplificada, a responsável pela forma do pulso de carga e do seu período de aplicação, nos ensaios laboratoriais de MR, é a válvula solenóide (três vias), que controla a abertura e fechamento da admissão de ar. Dependendo do tempo de abertura da válvula solenóide e da forma como o ar é admitido no sistema, tem-se a forma e o período do pulso de carga resultante.

Como o ar é compressível, o tempo de abertura da solenóide não corresponde ao período do pulso de carga, que associado à inércia do sistema pneumático, só comanda a forma do pulso de carga para tempos grandes, como visto na Figura 3.1. Para tempos pequenos, como o utilizado no ensaio de MR, 0,1s (pulso considerado como padrão), sua forma e período são muito sensíveis à combinação de tempo de abertura da válvula solenóide, com a vazão de ar admitido e do volume de ar mobilizado durante o golpe.

Para as calibrações dos pulsos de carga utilizados, verificou-se uma série de processos. O primeiro é o controle da vazão de ar admitido com uso de uma válvula de controle de vazão série 5012, da marca Parker. Considerou-se adequado uma vazão de $1,42E+07\text{mm}^3/\text{s}$ de ar. O segundo processo é o tempo de abertura da válvula solenóide, que foi determinado como sendo de $1/4$ do tempo do pulso de carga desejado. Ou seja, para um pulso de 0,1s, o tempo de abertura da válvula solenóide é de 0,025s.

A Figura 3.11 ilustra a variação do pulso de carga com o volume de ar admitido no cilindro. Observa-se que para um volume mobilizado de $2,60E+05\text{mm}^3$ o tempo do pulso de carga aumenta em 50% em relação a um volume mobilizado de 0mm^3 para um tempo de 0,025s de solenóide aberta. Este valor aumenta para 100% quando o volume mobilizado passa a $3,80E+05\text{mm}^3$. Um volume de $2,60E+05\text{mm}^3$ pode, por exemplo, ser proveniente de um avanço de 21mm do êmbolo de um cilindro pneumático de $1,23E+04\text{mm}^2$ de área.

O pulso de carga usado nos ensaios de MR com tempo de 0,1s foi o ilustrado na Figura 3.12, na qual está sobreposto para efeito comparativo um pulso padrão do tipo semi-seno-verso. Foi utilizado para tanto, um cilindro pneumático de 125mm de diâmetro, volume de ar mobilizado no cilindro próximo de zero, tempo de abertura da válvula solenóide de 0,025s, e válvula de controle de vazão regulada para $1,42E+07\text{mm}^3/\text{s}$ de ar.

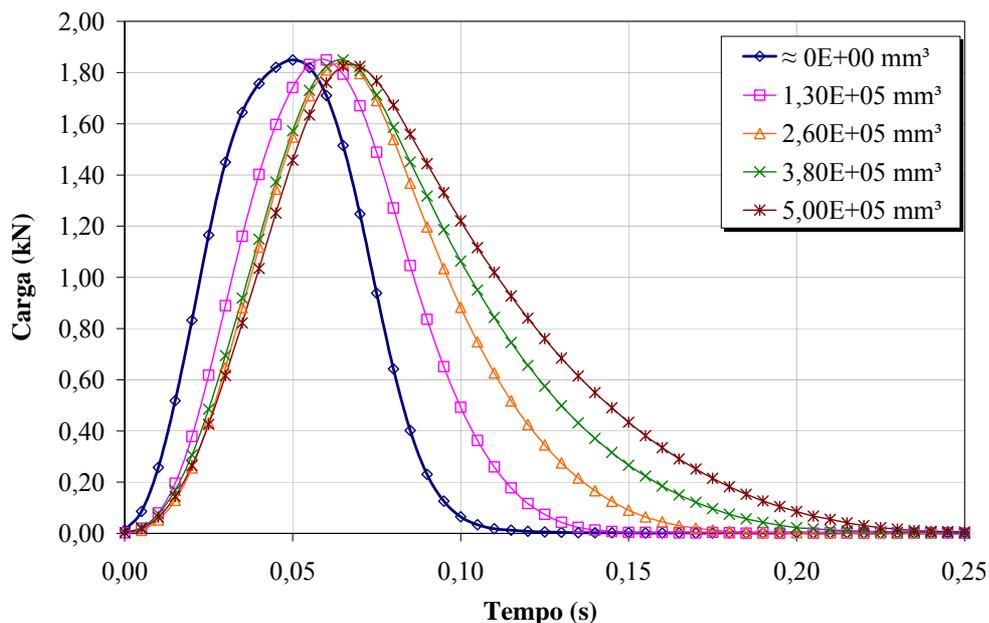


Figura 3.11 – Volume de ar mobilizado *versus* período do pulso de carga.

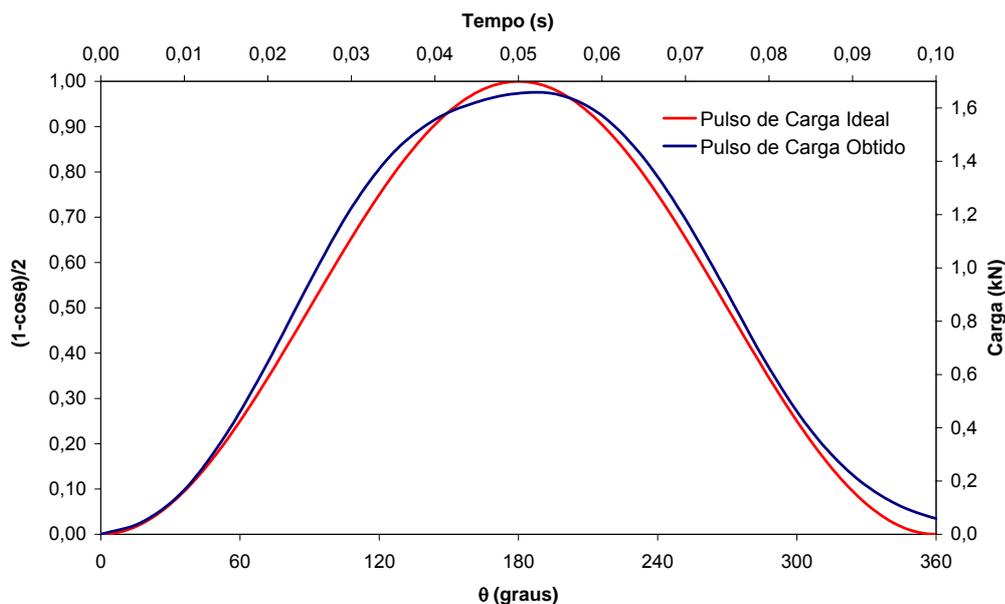


Figura 3.12 – Pulso de carga usado nos ensaios de MR com duração de 0,1s

3.2.4 Determinação do tempo de atraso do equipamento utilizado

Como se tinha o interesse de fazer medições de tempo de atraso do pulso de deslocamento em relação ao pulso de carga para que se pudesse desta forma, medir um ângulo de defasagem, semelhante ao ângulo de fase medido nos ensaios de módulo complexo, é imprescindível a determinação do tempo de atraso gerado pelo sistema.

De acordo com os especialistas do LCPC/Nantes, este atraso pode chegar a valores elevados, com defasagens na ordem de 30° devido ao atraso da resposta do equipamento nos ensaios de módulo complexo lá existentes. Recomendam, por tanto, que seja determinado o atraso do equipamento utilizado por meio de uso de um material puramente elástico com rigidez próxima a de um concreto asfáltico, adequando, para tanto, às características geométricas do corpo-de-prova.

O sistema de ensaio de módulo de elasticidade por compressão diametral da Universidade de Nottingham, conhecido como NAT (*Nottingham Asphalt Tester*) utiliza um corpo-de-prova cilíndrico vazado de alumínio (101,6mm de diâmetro) para calibração do equipamento. No intuito de produzir um corpo-de-prova semelhante, mas que o sistema de posicionamento de LVDTs pudesse ser colado na face deste, foi então concebido um corpo-de-prova cilíndrico de 40mm de espessura e diâmetro de 101,6mm com um furo central de 30mm em dura-alumínio para a determinação do tempo de atraso do sistema. Através de análises com o software Ansys© foi determinado o diâmetro necessário para que fossem obtidos deslocamentos próximos aqueles com os corpos-de-prova de concreto asfáltico. O corpo-de-prova de calibração NAT e o corpo-de-prova concebido para determinação do tempo de atraso do SEEPAV 8200 estão apresentados na Figura 3.13.

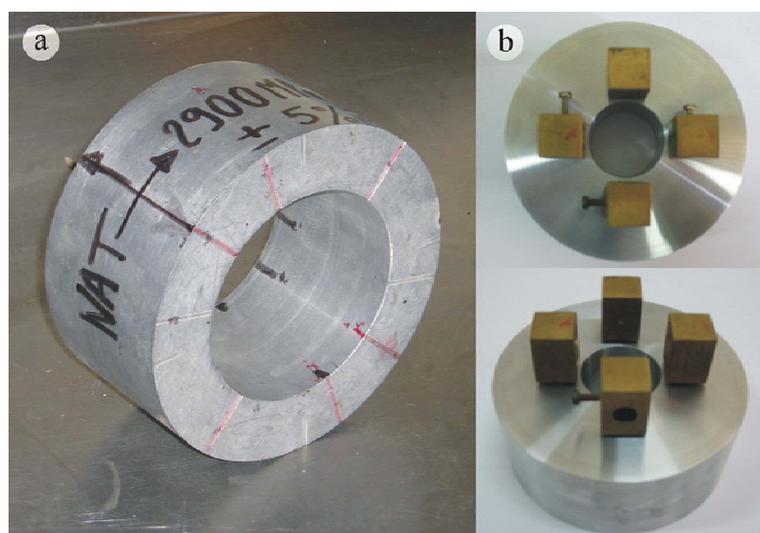


Figura 3.13 – CP calibração NAT (a) e CP calibração SEEPAV (b)

Após uma série de ensaios, percorrendo vários níveis de carga e frequências de ensaio, determinou-se que o atraso devido ao sistema pode ser negligenciado por se tratar de valores muito próximos a zero.

3.2.5 Sensores de deslocamento

Foram utilizados dois sensores de deslocamento do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), um para leitura dos deslocamentos verticais e outro para leitura dos deslocamentos horizontais. O LVDT utilizado para leitura dos deslocamentos horizontais, é da Sensotec, modelo PLVX AY111HM com curso total de $\pm 2,54$ mm. Para leitura dos deslocamentos verticais, adquiriu-se um LVDT marca Schaevitz, modelo MHR025 com curso total de $\pm 0,64$ mm. Ambos os sensores estão apresentados na Figura 3.14.

Como o sistema de controle de ensaio utilizado não possui condicionador de sinais para LVDTs tipo AC, que é o tipo dos empregados, utilizou-se uma placa condicionadora marca Schaevitz, modelo LVM-110, com três estágios de ganho primário (0,4x; 1,0x; 4,0x) e dois estágios secundários (Alto e Baixo).

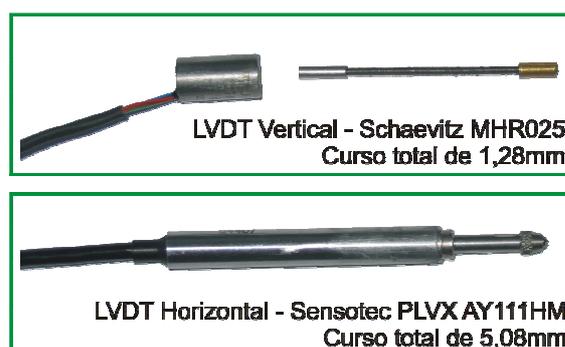


Figura 3.14 – Sensores de deslocamento usados na pesquisa

O curso em uso dos LVDTs foram determinados através do nível de ganho selecionado na placa condicionadora AC/DC de acordo com a magnitude dos deslocamentos. A Tabela 3.2 apresenta a relação dos cursos dos LVDTs em função dos estágios de ganhos.

Tabela 3.2 – Curso dos LVDTs utilizados em função dos estágios de ganho

| | Sensotec PLVX | | | | | | Schaevitz MHR | | |
|--|---------------|------|------|-------|------|------|---------------|------|------|
| | 0,4 | 1,0 | 4,0 | 0,4 | 1,0 | 4,0 | 0,4 | 1,0 | 4,0 |
| Estágio primário de ganho (Condicionadora) | 0,4 | 1,0 | 4,0 | 0,4 | 1,0 | 4,0 | 0,4 | 1,0 | 4,0 |
| Estágio secundário de ganho (Condicionadora) | Baixo | | | Alto | | | Baixo | | |
| Estágio terciário de ganho (SEPAV) | Baixo | | | Baixo | | | Baixo | | |
| Curso útil (mm) | 3,40 | 1,38 | 0,34 | 3,11 | 0,63 | 0,16 | 1,35 | 0,52 | 0,13 |

Utilizaram-se as seguintes configurações de ganhos nos ensaios de MR [citados na seguinte ordem: nível de ganho primário; nível baixo de ganho secundário; nível de ganho terciário (SEEPAV)]:

- LVDT MHR nos ensaios de MR a 10°C → 4,0; Baixo; Baixo
- LVDT PLVX nos ensaios de MR a 10°C → 4,0; Baixo; Baixo
- LVDT MHR nos ensaios de MR a 25°C → 1,0; Baixo; Baixo
- LVDT PLVX nos ensaios de MR a 25°C → 4,0; Baixo; Baixo
- LVDT MHR nos ensaios de MR a 35°C → 1,0; Baixo; Baixo
- LVDT PLVX nos ensaios de MR a 35°C → 1,0; Baixo; Baixo

3.3 MÉTODOS EMPREGADOS

3.3.1 Ensaio de módulo de resiliência

Na determinação do módulo de resiliência das misturas asfálticas analisadas utilizaram-se ensaios laboratoriais de tração indireta por compressão diametral cíclica. Para realização dos ensaios foi considerado um conjunto de normas e recomendações existentes na literatura internacional, uma vez que a norma brasileira vigente para o ensaio de MR – DNER ME 133/94, é pouco detalhada. Os procedimentos de ensaio apresentados no capítulo 2, item 2.4, foram compilados e o procedimento de ensaio descrito a seguir considerado para a realização dos testes.

- Observou-se o pré-requisito de calibração dos sensores de deslocamento e carga quando do início do ensaio e uma checagem de calibração após 50% dos ensaios concluídos.
- Para calibração do equipamento foi utilizado um corpo-de-prova sintético de polietileno, referenciado por Vianna (2002).
- Os corpos-de-prova utilizados foram cilíndricos do tipo Marshall com diâmetro de 101,6mm e altura de 64mm±2, sendo todos verificados quanto ao paralelismo das faces através de quatro medições de espessura em intervalos de 90°. Corpos-de-prova com diferença em uma das leituras maior do que 0,3mm da média foram descartados.

- Antes de executar os ensaios de MR, foi determinada a resistência à tração característica da mistura testada através da média de três corpos-de-prova, conforme a especificação apresentada no item 3.3.3.
- O sistema utilizado foi do tipo pneumático, com carregamento de topo em pórtico fechado, instalado em câmara termo-regulável com precisão de 0,5°C. O pórtico de aplicação de carga é composto por uma base rígida e viga de reação de altura regulável presa à base por meio de hastes.
- O tipo de onda a que foram submetidos os corpos-de-prova foi o semi-seno-verso, salvo aqueles ensaios em que se avaliou a forma do pulso de carga quadrada, conforme especificado no item 3.2.3.
- O dispositivo de carregamento foi o apresentado na Figura 3.7, com frisos de carregamento de largura igual a 12,7mm, raio de curvatura de 50,8mm, base inferior fixa e base superior móvel conectada às hastes-guia por meio de buchas metálicas lubrificadas. O dispositivo de carregamento era visualmente avaliado antes de cada ensaio executado, bem como a limpeza dos frisos de carregamento.
- A carga de contato foi sempre constante, correspondendo ao peso próprio da base superior do dispositivo de carregamento utilizado, a saber: 0,025kN.
- A montagem do ensaio seguiu à seguinte rotina:
 - Colagem das peças de suporte dos LVDTs com resina epóxi com no mínimo 24 horas de antecedência dos ensaios.
 - Após condicionamento em estufa termo-controlada, fixação dos LVDTs junto às peças suporte com o corpo-de-prova dentro da estufa e com auxílio do software de controle para posicionamento na zona adequada de medição dos sensores.
 - Posicionamento do corpo-de-prova sobre o pórtico de carregamento com auxílio de um gabarito em forma de “E” para assegurar o alinhamento dos LVDTs.
 - Instalação do pórtico de carregamento sob o eixo de aplicação de carga.

- Os carregamentos aplicados foram sempre em função de um percentual definido da RT determinada previamente. Considerou-se como valor padrão 15% do valor da RT. O software de controle, a partir das características geométricas do corpo-de-prova, e do valor de RT inserido, determina a carga de ruptura para aquele corpo-de-prova e aplica o percentual de carga selecionado.
- Procedeu-se à gravação dos dados de carregamento e deslocamento horizontal e vertical em arquivo formato texto, para pós-análise dos resultados.

A Figura 3.15 mostra a seqüência de colagem das peças de suporte dos LVDTs no corpo-de-prova, o posicionamento dos LVDTs no mesmo e também um corpo-de-prova já no pórtico de carregamento pronto para ensaio.

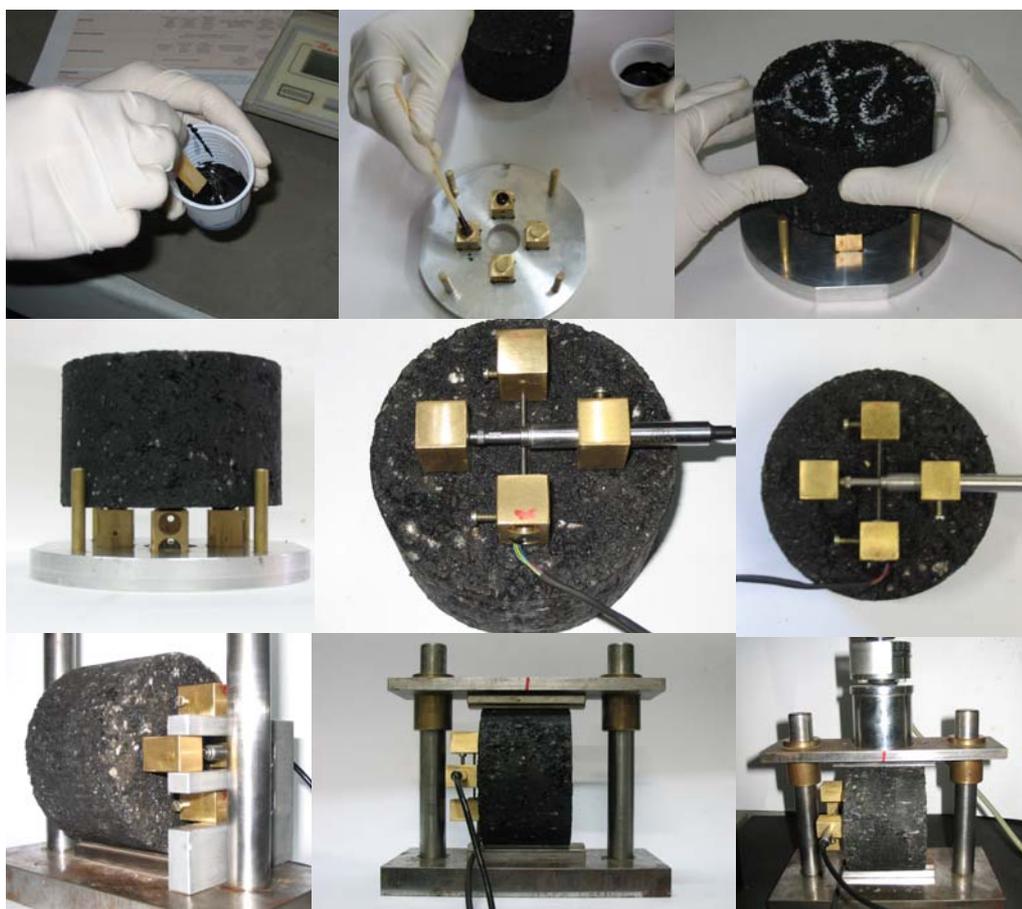


Figura 3.15 – Seqüência de montagem do ensaio de MR

A nomenclatura dos pontos de análise utilizados pela pesquisa NCHRP 1-28/1-28A para determinação dos deslocamentos resilientes está apresentada na Figura 3.16. Na Figura 3.17 estão apresentados os períodos de análise preconizados pelo Protocolo P07 aplicados em um

pulso de deslocamento utilizando um sistema de medição externo ao corpo-de-prova (como aquele apresentado na Figura 3.6); na Figura 3.18 apresentam-se os mesmos períodos aplicados em um pulso de deslocamento obtido a partir do sistema de posicionamento de LVDTs utilizado nesta pesquisa (colados na face). Note-se, que por haver uma diferença no tempo da resposta da parcela visco-elástica do deslocamento (considerando-se que o tempo de resposta do sistema foi o mesmo), há uma variação significativa do coeficiente angular da reta de regressão 1, o que leva também a uma variação na determinação do MR. Os tempos utilizados para determinação das retas de regressão são aqueles apresentados na Tabela 2.3.

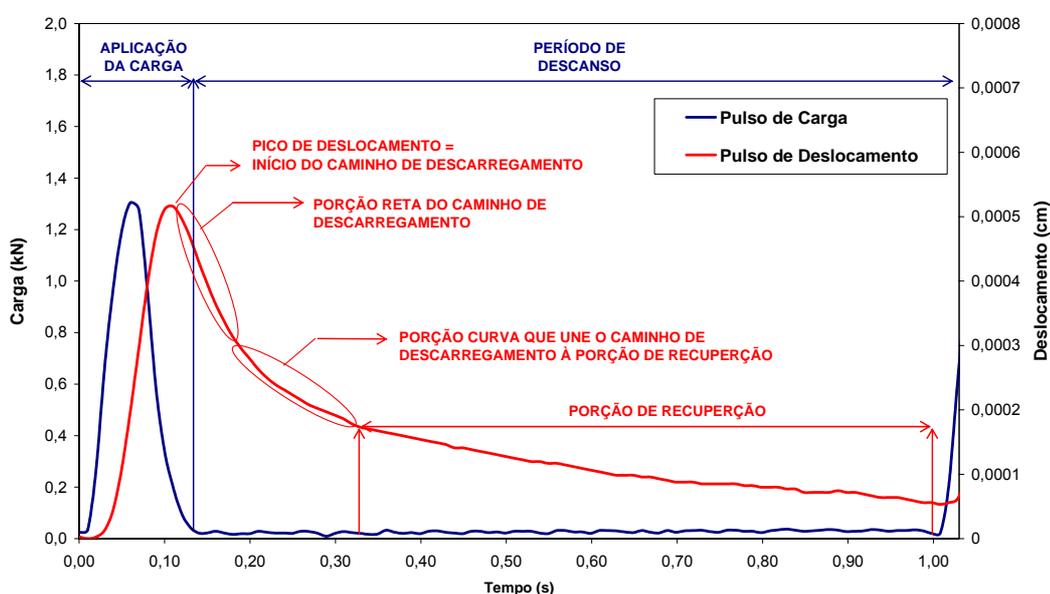


Figura 3.16 – Nomenclatura utilizada pela pesquisa 1-28/1-28A do NCHRP

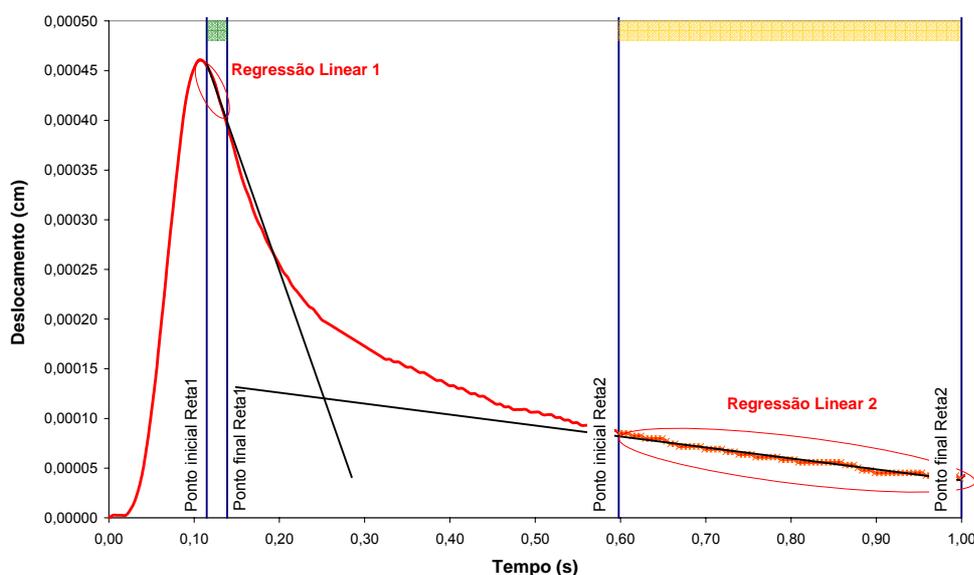


Figura 3.17 – Períodos de análise preconizados pelo Protocolo P07 em um pulso de deslocamento horizontal medido com sensor preso externamente ao corpo-de-prova

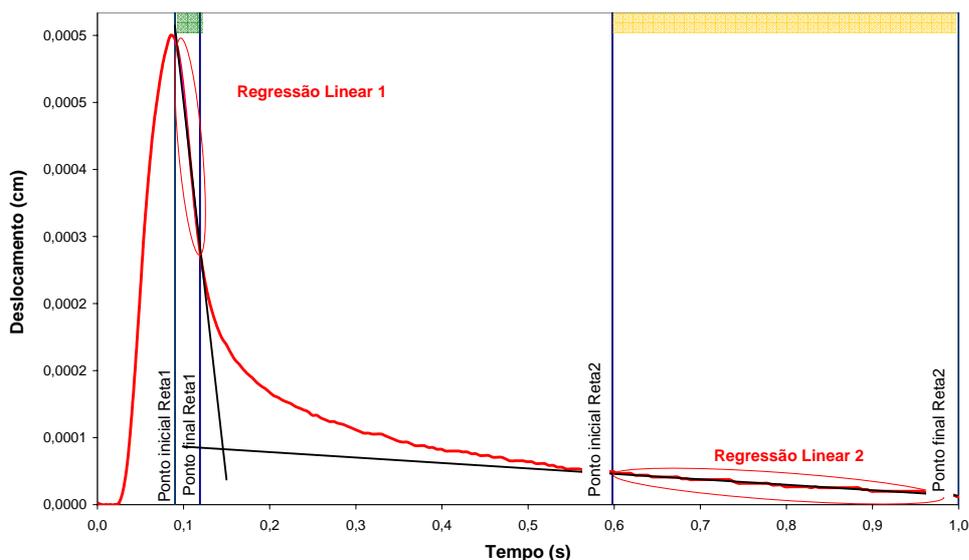


Figura 3.18 – Períodos de análise preconizados pelo Protocolo P07 em um pulso de deslocamento horizontal medidos com sensores presos na face do corpo-de-prova

Ressalva-se que não foi calculado, conforme sugerido pelo Protocolo P07, o deslocamento resiliente total, pois o algoritmo do software não está preparado para tanto. Cabe salientar que a diferença entre o algoritmo de cálculo do deslocamento resiliente total, preconizado pelo Protocolo P07 em relação ao sugerido pela pesquisa 1-28/1-28A do NCHRP, resulta em diferenças próximas de 1%.

Para a análise dos deslocamentos segundo o algoritmo proposto pela Pesquisa NCHRP 1-28/1-28A, ilustrado na Figura 2.22 *c* utilizaram-se como limites de regressões os seguintes:

- Para a reta de regressão linear da porção reta do caminho de descarregamento, a pesquisa 1-28/1-28A não apresenta os limites a serem utilizados. Sugere-se, então, que a reta inicie em um ponto atrasado 0,005s do pico de deslocamento e termine em um período de tempo igual a “ t do pico de deslocamento + $\frac{1}{2}t$ do pulso de carga”. Esta proposição é feita baseada nos estudos realizados por esta pesquisa. A parcela de deslocamento que está sendo visada com esta regressão linear é a parcela puramente elástica. Portanto, deveria retornar imediatamente junto com a liberação do carregamento (logo após o pico de carga). É coerente dizer que o atraso que aí existe é devido à inércia do material e, portanto, acrescenta-se o período tomado para elevar a carga de zero ao máximo como sendo o período de inércia que a corpo-de-prova apresenta. Desta forma, para um pulso de carga de 0,1s, tomar-se-á a reta de regressão linear da porção reta do caminho de descarregamento entre o pico de deslocamento e 0,05s após este pico. Para os pulsos de carga de 0,15s analisados, avançou-se 0,075s

em relação ao pico e, finalmente, para os pulsos de carga de 0,20s, utilizou-se o tempo de fim desta reta de regressão linear 0,1s adiante do pico de deslocamento.

- Para a regressão hiperbólica 1, utilizou-se o ponto de fim da reta de regressão linear da porção reta do caminho de descarregamento e o ponto de início da regressão hiperbólica 2.
- Para a regressão hiperbólica 2, utilizou-se a porção de tempo compreendida entre 40% e 90% do período de descanso. Para um pulso de carga de 0,1s, isto equivale a um tempo absoluto (referenciado no início do pulso de carga) de 0,46s e 0,91s. Para os pulsos de 0,15s utilizou-se o período compreendido entre 0,49s e 0,915s. Finalmente, nos pulsos de carga de 0,20s de duração, o intervalo adotado foi de 0,52s a 0,92s.
- Procede-se, após, à determinação da reta tangente à regressão hiperbólica no ponto equivalente a 55% do período de descanso (0,595s – referência absoluta). Do ponto de interseção desta reta tangente com a regressão linear determinada a partir da porção reta do caminho de descarregamento, aplica-se a coordenada x (tempo) na regressão hiperbólica 2, para se obter o ponto que representa o fim da parcela elástica do deslocamento. Para determinação então do deslocamento resiliente instantâneo subtrai-se este valor da coordenada de deslocamento máximo no pulso.
- Para determinação do deslocamento resiliente total, efetua-se a diferença entre o deslocamento médio no período compreendido entre 85% e 95% do período de descanso (0,865s e 0,955s – referência absoluta) e o ponto de deslocamento máximo no pulso.

Os intervalos acima descritos, tanto em relação ao Protocolo P07 quanto à pesquisa 1-28/1-28A, são válidos para ensaios sob frequência de 1Hz. Na determinação dos deslocamentos resilientes nos ensaios realizados a 3Hz e 5Hz, utilizou-se tão somente a diferença entre o ponto de deslocamento máximo e o ponto de deslocamento mínimo no pulso. Estes valores aproximam-se dos deslocamentos instantâneos calculados pelo algoritmo do NCHRP 1-28/1-28A.

A formulação utilizada para determinação do MR e do coeficiente de Poisson seguiu o critério apresentado por Zhang *et al.* (1997). A partir dos coeficientes apresentados na Tabela 2.2, considerando-se que os pontos de deslocamentos medidos foram distantes $\frac{1}{2}$ diâmetro do corpo-de-prova ($\frac{1}{2} \times 101,6\text{mm} = 50,8\text{mm}$), tem-se $m,n=0,5$ tanto para os deslocamentos verticais quanto horizontais e $a/2R=1/8$. Desta forma, as equações 3.1 e 3.2 foram as utilizadas para determinação do MR, e a equação 3.3, para cálculo do coeficiente de Poisson.

Salienta-se, que estas são as formulações apresentadas também pela pesquisa NCHRP 1-28/1-28A, que preconiza a medição dos deslocamentos como o adotado nesta pesquisa.

$$MR = \frac{P_{cicl}}{\delta_h t} (0,2339 + 0,7801\nu) \quad (3.1)$$

$$MR = \frac{P_{cicl}}{\delta_v t} (-1,0695 - 0,3074\nu) \quad (3.2)$$

$$\nu = \frac{-1,0695 - 0,2339 \frac{\delta_v}{\delta_h}}{0,3074 + 0,7801 \frac{\delta_v}{\delta_h}} \quad (3.3)$$

Onde:

δ_h = deslocamento horizontal medido

δ_v = deslocamento vertical medido

Outros símbolos já definidos anteriormente

3.3.2 Correção do abaulamento

Roque e Buttlar (1992) mostram que devido ao efeito de abaulamento do corpo-de-prova durante o ensaio de módulo de resiliência, quando os LVDTs são colados nas faces, há uma rotação dos mesmos que leva a um erro na medição tanto dos deslocamentos horizontais, quanto dos verticais. A correção por eles proposta, entretanto, só é válida para relação de distância entre sensores e o diâmetro do corpo-de-prova de 1/4.

Kim e Wen (2002) relatam que pelo princípio do EVR, conforme tratado anteriormente no item 3.2.2, uma distância entre sensores de ½ diâmetro é a adequada. Sugere ainda que não há necessidade de se fazer correções de abaulamento quando da colagem dos LVDTs junto às faces, uma vez que os erros encontrados na medição dos deslocamentos foi de 2,4% para medições horizontais e 2,5% para medições verticais, podendo estes serem desconsiderados. Não é, entretanto, mencionado no trabalho qual a distância da face do corpo-de-prova a que os sensores foram posicionados.

Como os LVDTs usados para determinação dos deslocamentos horizontais e verticais têm 8mm e 9,5mm de diâmetro, respectivamente, os mesmos ficaram afastados 18mm e 6,75mm

da superfície do corpo-de-prova. Desta forma, acredita-se que os erros tenham sido maiores do que aqueles mostrados por Kim e Wen (2002). Decidiu-se, então, por gerar uma correção a partir de análises realizadas pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) com auxílio do programa Abaqus©.

Na análise realizada, o tipo de elemento finito utilizado foi o hexaedro composto por 8 nós isoparamétricos, um nó em cada vértice com interpolação linear para os deslocamentos. O tamanho do elemento finito para a criação da malha foi da ordem de 2mm. Considerou-se um friso de carregamento com propriedades do aço ($E = 210\text{GPa}$ e $\nu = 0,3$) e atrito com corpo-de-prova igual a 75% do atrito máximo. A consideração de atrito máximo elevaria o tempo de processamento em aproximadamente cinco vezes e resultaria em valores com diferenças menores de 0,5% daqueles obtidos com 75% do atrito máximo, como indicou uma análise prévia.

O modelo usado na análise está apresentado na Figura 3.19. Para que se pudesse utilizar uma malha suficientemente refinada, sem perdas de tempo de processamento, e também como já está consagrada na literatura, utilizou-se o modelo de 1/8 de corpo-de-prova. Este modelo de um quarto de círculo e meia espessura pode utilizar o mesmo número de elementos que um modelo completo sem perda de precisão.

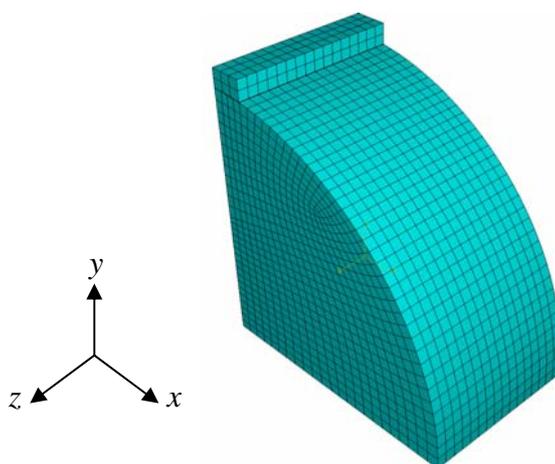


Figura 3.19 – Modelo de elemento finito utilizado na análise de MEF para correção do abaulamento

A análise realizada para elaboração da correção dos deslocamentos foi baseada nos deslocamentos no eixo Z durante o carregamento. Com estes deslocamentos, determinou-se a linha de contorno do abaulamento e sobre esta, determinado uma reta perpendicular na posição de colagem de cada bloco de suporte dos LVDTs. Com isto, é possível determinar

qual o ângulo de rotação dos mesmos e, a partir do afastamento da face, qual o erro de medição que se têm tanto nos deslocamentos horizontais quanto verticais. Note-se, a partir da análise da Figura 2.23, apresentada no capítulo 2, que a correção para os deslocamentos horizontais são reduções nos deslocamentos lidos, enquanto para os deslocamentos verticais são acréscimos aos deslocamentos registrados.

A Tabela 3.3 apresenta os resultados e os parâmetros de entrada em cada uma das análises realizadas.

Tabela 3.3 – Resultado das análises realizadas para determinação da correção por abaulamento

| MR (MPa) | RT (MPa) | ν | Temp °C | Carga (N) | Correção Vertical (mm) | Correção Horizontal (mm) |
|---------------------|---------------------|-------------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 1000 | 0,80 | 0,42 | 35 | 1216 | +2,07E-03 | -2,88E-03 |
| 1000 | 0,80 | 0,42 | 35 | 2432 | +3,60E-03 | -5,69E-03 |
| 1000 | 0,80 | 0,42 | 35 | 3243 | +4,41E-03 | -7,49E-03 |
| 2000 | 0,80 | 0,42 | 35 | 1216 | +1,13E-03 | -1,48E-03 |
| 2000 | 0,80 | 0,42 | 35 | 2432 | +2,09E-03 | -2,92E-03 |
| 2000 | 0,80 | 0,42 | 35 | 3243 | +2,69E-03 | -3,85E-03 |
| 3000 | 0,80 | 0,42 | 35 | 1216 | +8,10E-04 | -9,72E-04 |
| 3000 | 0,80 | 0,42 | 35 | 2432 | +1,47E-03 | -1,94E-03 |
| 3000 | 0,80 | 0,42 | 35 | 3243 | +1,90E-03 | -2,59E-03 |
| 4000 | 1,50 | 0,35 | 25 | 2280 | +8,64E-04 | -1,08E-03 |
| 4000 | 1,50 | 0,35 | 25 | 4560 | +1,61E-03 | -2,16E-03 |
| 4000 | 1,50 | 0,35 | 25 | 6080 | +2,05E-03 | -2,88E-03 |
| 8000 | 2,00 | 0,35 | 25 | 3040 | +6,21E-04 | -7,20E-04 |
| 8000 | 2,00 | 0,35 | 25 | 6080 | +1,15E-03 | -1,44E-03 |
| 8000 | 2,00 | 0,35 | 25 | 8107 | +1,50E-03 | -1,94E-03 |
| 12000 | 2,75 | 0,35 | 25 | 4180 | +5,81E-04 | -6,84E-04 |
| 12000 | 2,75 | 0,35 | 25 | 8361 | +1,08E-03 | -1,33E-03 |
| 12000 | 2,75 | 0,35 | 25 | 11148 | +1,42E-03 | -1,76E-03 |
| 16000 | 3,50 | 0,21 | 10 | 3547 | +2,84E-04 | -3,24E-04 |
| 16000 | 3,50 | 0,21 | 10 | 5320 | +4,19E-04 | -4,68E-04 |
| 16000 | 3,50 | 0,21 | 10 | 7094 | +5,40E-04 | -6,12E-04 |
| 22000 | 4,50 | 0,21 | 10 | 4560 | +2,70E-04 | -2,88E-04 |
| 22000 | 4,50 | 0,21 | 10 | 6841 | +3,92E-04 | -4,32E-04 |
| 22000 | 4,50 | 0,21 | 10 | 9121 | +5,13E-04 | -5,76E-04 |

A partir desta tabela, utilizando regressões múltiplas pelo método dos mínimos quadrados, através do programa computacional Microsoft Excel©, determinaram-se modelos a 2 variáveis, carga e MR, para determinação da correção vertical e também da correção horizontal para cada temperatura testada. A equação 3.4 apresenta o modelo utilizado de correção, cujos coeficientes encontram-se na Tabela 3.4, que ainda apresenta os coeficientes de correlação dos modelos e o teste estatístico F.

Equação de correção dos deslocamentos medidos devido ao efeito de abaulamento

$$\Delta_{corr} = (m_1 \times MR(MPa)) + (m_2 \times P_{cicl}(N)) + b \quad (3.4)$$

Onde

Δ_{corr} = correção do deslocamento horizontal / vertical (mm)

Tabela 3.4 – Coeficientes para correção dos deslocamentos pelo efeito de abaulamento

| | | 35°C | 25°C | 10°C |
|---------------------------------|----------------|------------|------------|------------|
| Correção Horizontal (y) (mm) | m ₁ | 1,758E-06 | 2,030E-07 | 2,372E-08 |
| | m ₂ | -1,416E-06 | -2,350E-07 | -6,995E-08 |
| | b | -3,575E-03 | -1,774E-03 | -4,754E-04 |
| | R ² | 0,89 | 0,84 | 0,98 |
| | F | 24 | 16 | 98 |
| Correção Vertical (y) (mm) | m ₁ | -9,833E-07 | -1,360E-07 | -1,907E-08 |
| | m ₂ | 8,249E-07 | 1,688E-07 | 6,045E-08 |
| | b | 2,314E-03 | 1,285E-03 | 3,975E-04 |
| | R ² | 0,93 | 0,87 | 0,98 |
| | F | 40 | 20 | 64 |

Vale lembrar que estas equações de correção só são válidas para o espaçamento e altura de sensores utilizados nesta pesquisa. Pequenas diferenças nestes valores acarretam em variações consideráveis nos coeficientes.

A escolha dos níveis de MR, RT e carga considerados para composição da tabela de correções foram baseados nos ensaios executados, aproximando-se desta forma dos resultados obtidos.

A escolha dos coeficientes de Poisson para realização das análises às temperaturas de 10° e 35°C foram baseados na experiência de Marques (2004). A escolha do coeficiente de Poisson para as análises de 25°C seguiu a recomendação da Pesquisa 1-28/1-28A, cujo ν adotado deve ser de 0,35.

3.3.3 Ensaio de resistência à tração

A determinação da resistência à tração dos corpos-de-prova utilizados nesta pesquisa foi feita através do ensaio de resistência à tração indireta, segundo as prescrições do DNER, atual DNIT, sob a norma DNER-ME 138/94.

O ensaio utiliza corpo-de-prova Marshall com 101,6mm de diâmetro e 63,5mm de altura. A velocidade de avanço da prensa é de 0,8mm/s e a equação utilizada para o cálculo da RT é a seguinte:

$$R_t = \frac{2P_{rup}}{\pi.d.t} \quad (3.5)$$

onde P_{rup} é a carga de ruptura registrada, d e t são o diâmetro e a altura do corpo-de-prova respectivamente.

O equipamento utilizado, apresentado na Figura 3.20, foi uma prensa mecânica com instalação de um sensor de deslocamento junto ao prato da prensa, para verificação da velocidade de avanço, e uma célula de carga de 50kN.



Figura 3.20 – Prensa para ensaio de RT por tração indireta instrumentada

O corpo-de-prova também foi instrumentado com um LVDT no diâmetro horizontal para determinação do deslocamento de ruptura. O sistema de aquisição de dados foi o mesmo utilizado no ensaio de MR, bem como os cuidados tomados para centralização do corpo-de-prova no pórtico de carregamento, descritos anteriormente.

3.3.4 Ensaio de fadiga

Os ensaios de fadiga realizados nesta pesquisa utilizaram corpos-de-prova Marshall com diâmetro de 101,6mm. O equipamento utilizado foi análogo ao empregado nos ensaios de MR. Procedeu-se à gravação de carga e deslocamento ao longo de toda a vida de fadiga para monitoramento do comportamento resiliente ao longo da vida de fadiga. Assim como nos ensaios de RT, como o corpo-de-prova é levado à ruptura completa, monitorou-se apenas os deslocamentos horizontais.

No plano horizontal, como os deslocamentos são de extensão, quando da ruptura do corpo-de-prova não há qualquer dano ao LVDT de ponta retrátil. Os deslocamentos verticais, no entanto, não puderam ser medidos pelo fato de os deslocamentos neste plano serem de compressão e o LVDT que se dispunha seria danificado durante a ruptura do corpo-de-prova.

O módulo de resiliência foi complementarmente calculado durante a vida de fadiga, para verificação do seu comportamento em função do número N de aplicações de carga. Como para determinação deste parâmetro, necessita-se apenas de um dos deslocamentos, tendo em vista que o coeficiente de Poisson já fora determinado a priori nos outros ensaios de MR, não houve qualquer prejuízo ao estudo a medição de apenas os deslocamentos horizontais.

Os ensaios foram realizados sob temperatura de 25°C em estufa termo-controlada.

3.4 MATERIAIS USADOS NA PESQUISA

A seguir são apresentados os materiais empregados neste estudo. Duas misturas asfálticas, um concreto asfáltico convencional e outro concreto asfáltico modificado com borracha (*via úmida*), foram dosadas para confecção dos corpos-de-prova no Laboratório de Tecnologia de Pavimentos da EPUSP. Estas misturas são as mesmas utilizadas em uma parte do estudo de doutorado em andamento do engenheiro Edson de Moura na EPUSP.

3.4.1 Cimento asfáltico

Foram utilizados dois cimentos asfálticos na composição das misturas estudadas: CAP 20 e Ecoflex B. O CAP 20 foi proveniente da Refinaria Henrique Lage (REVAP), localizada na cidade de São José dos Campos/SP. Suas propriedades estão apresentadas na Tabela 3.5. O ligante asfáltico Ecoflex B, é um ligante comercial obtido através da incorporação de pó de borracha ao asfalto, comercializado pela Greca Asfaltos S.A. As propriedades do Ecoflex B estão apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.5 – Propriedades do CAP 20 utilizado na pesquisa
(Dados fornecidos pela BR Distribuidora SA)

| <i>Ensaio</i> | <i>Método</i> | <i>Especificação CAP20</i> | <i>Resultado</i> | <i>Unidade</i> |
|--|-------------------|----------------------------|------------------|----------------|
| <i>Viscosidade Absoluta a 60°C</i> | <i>ASTM D2171</i> | 2000 a 3500 | 2550 | P |
| <i>Viscosidade Saybol Furol a 135°C</i> | <i>ASTM E102</i> | 120 mín. | 183,0 | s |
| <i>Viscosidade Saybol Furol a 177°C</i> | <i>ASTM E102</i> | 30 a 150 | 36,0 | s |
| <i>ECA – Variação</i> | <i>ASTM D1754</i> | 1,0 máx | 0,32 | % |
| <i>ECA – Relação de viscosidade a 60°C</i> | <i>X 016*</i> | 4,0 máx | 2,8 | |
| <i>ECA – Ductilidade a 25°C</i> | <i>ASTM D113</i> | 20 mín | 150 | cm |
| <i>Índice de Suscetibilidade Térmica</i> | <i>X 018*</i> | -1,5 a 1,0 | -1,1 | |
| <i>Penetração</i> | <i>ASTM D5</i> | 50 mín | 56 | 0,1 mm |
| <i>Ponto de Fulgor</i> | <i>ASTM D92</i> | 235 mín | 304 | °C |
| <i>Solubilidade no Tricloroetileno</i> | <i>ASTM D2042</i> | 99,5 mín | 99,9 mín | % massa |
| <i>Densidade Relativa a 20/4°C</i> | <i>ASTM D70</i> | Anotar (1) | 1,015 | |
| <i>Aquecimento a 175°C</i> | <i>X 215*</i> | NESP (2) | NESP | |

* Métodos utilizados nos ensaios não especificados pelo fornecedor do ligante

Tabela 3.6 – Propriedades do Ecoflex B utilizado na pesquisa
(Dados fornecidos pelo laboratório da Greca Asfaltos S.A.)

| <i>Ensaio</i> | <i>Especificação</i> | <i>EcoflexB* (22/03/2005)</i> | <i>Unidade</i> |
|---------------------------------------|---|-----------------------------------|-------------------|
| <i>Ponto de Amolecimento</i> | NBR 6560 (>55) | 59 | °C |
| <i>Penetração a 25°C, 100g, 5 seg</i> | NBR 6576 (25-75) | 48 | dmm |
| <i>Viscosidade Aparente a 175°C</i> | ASTM D2196/98 (800-2500) spindle3 20RPM | 1520 | cP |
| <i>Ponto de Fulgor</i> | NBR 11341 (>235) | 280 | °C |
| <i>Massa Específica 25°C</i> | NBR 6296 | 1,022 | g/cm ³ |
| <i>Recuperação Elástica a 25°</i> | NLT 329/91 (>50) | 70 | |

3.4.2 Agregados minerais

Os agregados, grãos e miúdos, utilizados nesta pesquisa foram fornecidos pela pedreira Sargon, localizada na cidade de Santa Isabel no estado de São Paulo, sendo a jazida de natureza granítica. Os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados foram fornecidos pelo laboratório de controle tecnológico da pedreira Sargon e encontram-se na Tabela 3.7 para agregados grãos, e na Tabela 3.8 para agregados miúdos.

Tabela 3.7 – Características da Brita 1 e Pedrisco

| <i>Propriedade</i> | <i>Resultados</i> |
|---|-------------------------|
| <i>Massa Específica Real - Brita 1</i> | 2,964 g/cm ³ |
| <i>Massa Específica Real - Pedrisco</i> | 2,693 g/cm ³ |
| <i>Abrasão Los Angeles</i> | 36,0% |
| <i>Índice de Forma</i> | 0,83% |
| <i>Durabilidade (ao sulfato de sódio)</i> | 2,6% |
| <i>Adesividade (c/ 0,1% de aditivo)</i> | Satisfatória |

Fonte: Dados fornecidos pela Pedreira Sargon

Tabela 3.8 – Características do Pó de pedra

| <i>Propriedade</i> | <i>Resultados</i> |
|--|-------------------------|
| <i>Massa Específica Real - Pó de Pedra</i> | 2,710 g/cm ³ |
| <i>Equivalente de areia</i> | 68,0% |
| <i>Durabilidade (ao sulfato de sódio)</i> | 3,8% |
| <i>Adesividade (c/ 0,1% de aditivo)</i> | Satisfatória |

Fonte: Dados fornecidos pela Pedreira Sargon

Foi ainda utilizado na composição das misturas asfálticas, como material de enchimento (filer), cal hidratada tipo CH-I, adquirida no mercado paulista sob o nome comercial Super-Cal Itaú.

O resultado médio das análises granulométricas realizadas nos agregados minerais utilizados na pesquisa encontram-se na Tabela 3.9, sendo que as granulometrias foram obtidas através do processo de lavagem na peneira número 200. Na Figura 3.21, estão apresentadas as curvas granulométricas dos agregados minerais empregados neste estudo.

Tabela 3.9 – Valores médios das análises granulométricas dos agregados

| Peneira | | Percentagem passante em massa (%) | | | |
|---------|-------|-----------------------------------|----------|-------------|-------------|
| n° | mm | Brita 0 | Pedrisco | Pó de pedra | Filer (CAL) |
| 3/4" | 19,1 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,00 |
| 1/2" | 12,7 | 48,3 | 100,0 | 100,0 | 100,00 |
| 3/8" | 9,5 | 13,8 | 99,0 | 100,0 | 100,00 |
| n 4 | 4,76 | 0,6 | 30,1 | 98,9 | 100,00 |
| n 8 | 2,38 | 0,4 | 10,8 | 77,2 | 100,00 |
| n 30 | 0,59 | 0,3 | 6,4 | 43,1 | 100,00 |
| n 50 | 0,297 | 0,3 | 5,5 | 32,4 | 100,00 |
| n 100 | 0,149 | 0,2 | 4,4 | 22,4 | 99,76 |
| n 200 | 0,074 | 0,2 | 3,1 | 14,2 | 95,91 |

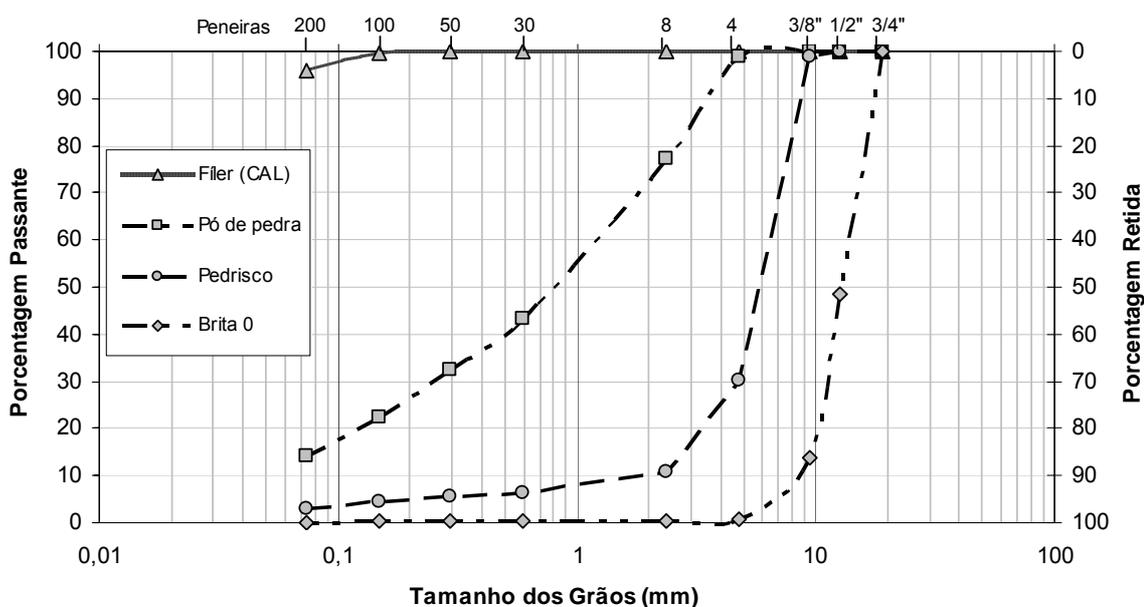


Figura 3.21 – Distribuição granulométrica dos agregados minerais utilizados no estudo

3.4.3 Mistura utilizada e confecção dos corpos-de-prova

Para a confecção dos corpos-de-prova utilizaram-se misturas asfálticas dosadas segundo a metodologia Marshall, que preconiza a preparação de corpos-de-prova cilíndricos de 101,6 mm de diâmetro por 63,5 mm de altura-referência.

As duas misturas asfálticas preparadas para este estudo, concreto asfáltico convencional (CA-C) e concreto asfáltico modificado com borracha (CA-AB), utilizaram os agregados e ligantes

asfálticos anteriormente apresentados. A faixa granulométrica utilizada para dosagem da mistura foi a faixa IVb do Instituto do Asfalto norte-americano, que é similar à faixa B especificada pelo DAER/RS. Ambas as misturas utilizaram a mesma composição granulométrica, apresentada na Figura 3.22.

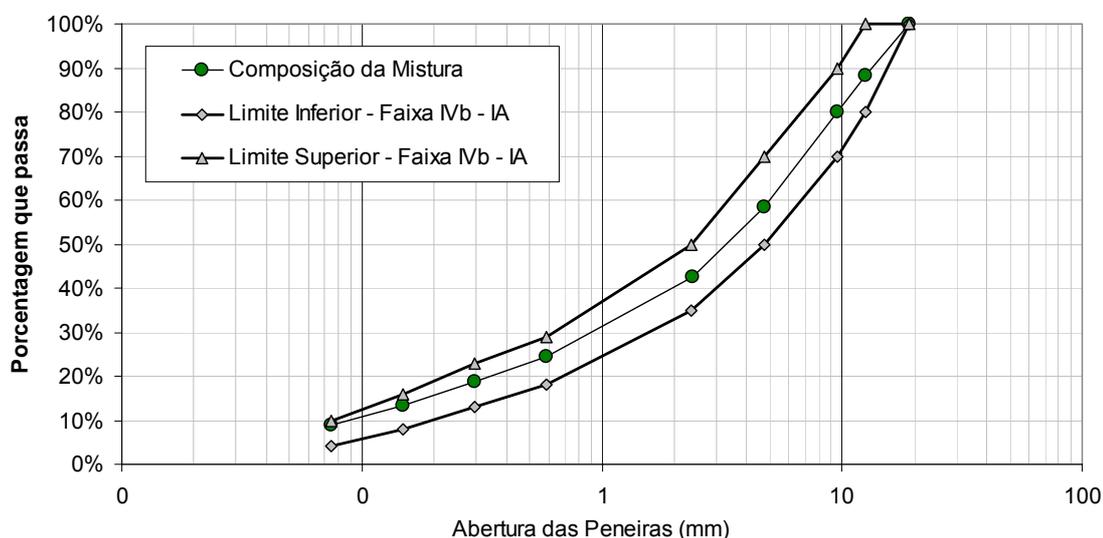


Figura 3.22 – Composição granulométrica das misturas asfálticas utilizadas na pesquisa

A temperatura de usinagem, tanto para a mistura CA-C quanto para a mistura CA-AB, ficou entre 165°C e 170°C, enquanto a temperatura de compactação, entre 145°C e 150°C. As características volumétricas resultantes das misturas projetadas, teor de ligante de projeto, volume de vazios (VV), vazios de agregado mineral (VAM), relação betume-vazios (RBV) e densidade máxima teórica (DMT), estão resumidas na Tabela 3.10. Salienta-se que o volume de vazios selecionado para determinação do teor de ligante de projeto, foi aquele mais próximo de 4% e que tenha apresentado melhor resistência à deformação permanente no ensaio realizado no simulador de tráfego francês da USP.

Tabela 3.10 – Resumo das características volumétricas das misturas utilizadas na pesquisa

| | <i>% Ligante</i> | <i>VV (%)</i> | <i>VAM (%)</i> | <i>RBV (%)</i> | <i>DMT</i> |
|--------------|------------------|---------------|----------------|----------------|------------|
| CA-C | 5,1 | 4,8 | 17 | 68,7 | 2,463 |
| CA-AB | 5,6 | 5,1 | 17,8 | 72,1 | 2,464 |

Os corpos-de-prova obtidos, entretanto, apresentaram volume de vazios abaixo do projeto e com uma variabilidade consideravelmente alta. Para os corpos-de-prova de CA-C, obtiveram-se valores de volume de vazios variando entre 2,0% e 3,9%, com valor médio de 2,9% e

desvio padrão de 0,5%. Para os corpos-de-prova de CA-AB, os valores ficaram entre 3,0% e 5,3%, com média de 4,0% e desvio padrão 0,54%.

Para que os resultados médios dos ensaios realizados não fossem prejudicados, ou não representativos, procedeu-se a distribuição dos corpos-de-prova em três grupos: VV baixo, VV médio e VV alto, conforme mostra a Tabela 3.11. Para cada grupo de ensaios realizado, utilizou-se um corpo-de-prova de cada grupo, perfazendo VV médio no grupo de 3,0% nos ensaios com CA-C e 4,0% nos ensaios de CA-AB. A distribuição seguiu um ordenamento de forma a que os grupos com maior desvio-padrão ficassem para os ensaios realizados sob temperatura de 35°C, e os grupos com menor desvio-padrão para os ensaios realizados sob temperatura de 25°C.

Tabela 3.11 – Classificação dos grupos de CPs segundo o volume de vazios.

| CA - C | |
|-----------------|---|
| | CPs descartados (VV < 2,01% e VV > 3,89%) |
| <i>VV Baixo</i> | CPs com 2,02% < VV < 2,60% |
| <i>VV Médio</i> | CPs com 2,60% < VV < 3,20% |
| <i>VV Alto</i> | CPs com 3,20% < VV < 3,88% |
| CA - AB | |
| | CPs descartados (VV < 3,00%) |
| <i>VV Baixo</i> | CPs com 3,00% < VV < 3,70% |
| <i>VV Médio</i> | CPs com 3,71% < VV < 4,39% |
| <i>VV Alto</i> | CPs com 4,40% < VV > 5,31% |

3.4.4 Resina Epóxi

Para a colagem dos blocos de posicionamento dos LVDTs utilizou-se uma resina do tipo epóxi. A escolha da mesma foi baseada na experiência de pesquisadores norte-americanos que utilizam para o mesmo tipo de finalidade a resina ITW Devcon. Em contato com a empresa ARALSUL Produtos Químicos LTDA, encontrou-se como produto equivalente no Brasil a resina comercial SW 419-1 BR, tipo epóxi formulado, cujo endurecedor é um composto de 35-40% de Dietilenotriamina, comercializado com o nome de HY 419 BR. O módulo de elasticidade do composto fica entre 4000 e 5500MPa.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os ensaios feitos nesta pesquisa utilizaram tanto corpos-de-prova de concreto asfáltico convencional (CA-C) quanto de concreto asfáltico com adição de borracha (*via úmida*). Os ensaios de RT e MR foram realizados a temperaturas de 10°C, 25°C e 35°C, tendo sido testados 3 corpos-de-prova por tipo de ensaio realizado. Os ensaios de fadiga foram realizados sob temperatura de 25°C, contando com 7 corpos-de-prova por tipo de mistura; os níveis de tensão escolhidos foram 40, 35, 30, 25, 20,15 e 10% da RT média da mistura.

Para apresentação dos gráficos de resultados da determinação do coeficiente de Poisson e módulo de resiliência, seguiu-se à seguinte codificação: MR/v@Temperatura de ensaio - (Frequência de ensaio; duração do pulso de carga; percentual de RT) - Algoritmo de calculo para determinação dos deslocamentos considerado.

Em relação à nomenclatura utilizada para os módulos de resiliência determinados a partir dos algoritmos em estudo, definiu-se como segue:

MRi_{P07} – Módulo resiliente instantâneo calculado a partir do algoritmo proposto pelo Protocolo P07 em função do deslocamento resiliente instantâneo.

MRi₁₋₂₈ – Módulo resiliente instantâneo calculado a partir do algoritmo proposto pela pesquisa NCHRP 1-28/1-28A (Barksdale *et al.* 1997) em função do deslocamento resiliente instantâneo.

MRT₁₋₂₈ – Módulo resiliente total calculado a partir do algoritmo proposto pela pesquisa NCHRP 1-28/1-28A (Barksdale *et al.* 1997) em função do deslocamento resiliente total.

4.1 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram realizados segundo a norma DNER, atual DNIT, ME-138/94 com velocidade de ruptura de 0,8mm/s em prensa instrumentada com célula de carga e medidor de deslocamento do prato de carregamento para

verificação da velocidade do mesmo. Os corpos-de-prova também foram instrumentados para medição local do deslocamento horizontal de ruptura através de LVDT colado na face do mesmo.

Foram ensaiados três corpos-de-prova para cada temperatura analisada (10°C, 25°C e 35°C), por tipo de mistura. A Tabela 4.1 apresenta os resultados de RT obtidos com as respectivas médias e desvio padrão de cada grupo de ensaio. Evidencia-se, como o esperado, queda no valor da RT com o crescimento da temperatura de ensaio.

Tabela 4.1 – Resultados de RT das misturas estudadas

| | | <i>CPI</i> | <i>CP2</i> | <i>CP3</i> | <i>Média</i> | <i>Desv.Pad.</i> | |
|--------------|-------------|-----------------|------------|------------|--------------|------------------|------|
| CA-C | 10°C | <i>VV (%)</i> | 2,49 | 2,66 | 3,32 | 2,82 | 0,44 |
| | | <i>RT (MPa)</i> | 4,64 | 4,26 | 4,05 | 4,31 | 0,30 |
| | 25°C | <i>VV (%)</i> | 2,36 | 2,71 | 3,53 | 2,87 | 0,60 |
| | | <i>RT (MPa)</i> | 1,83 | 1,77 | 1,60 | 1,73 | 0,12 |
| | 35°C | <i>VV (%)</i> | 2,11 | 2,84 | 3,88 | 2,94 | 0,89 |
| | | <i>RT (MPa)</i> | 1,03 | 0,82 | 0,77 | 0,87 | 0,14 |
| CA-AB | 10°C | <i>VV (%)</i> | 3,50 | 3,82 | 4,43 | 3,92 | 0,47 |
| | | <i>RT (MPa)</i> | 3,06 | 3,68 | 3,46 | 3,40 | 0,31 |
| | 25°C | <i>VV (%)</i> | 3,30 | 4,05 | 4,75 | 4,03 | 0,73 |
| | | <i>RT (MPa)</i> | 1,87 | 1,60 | 1,62 | 1,70 | 0,15 |
| | 35°C | <i>VV (%)</i> | 3,03 | 3,92 | 5,31 | 4,09 | 1,15 |
| | | <i>RT (MPa)</i> | 1,16 | * | 0,88 | 1,02 | 0,19 |

* Perdido por erro de gravação de dados

Por ter sido constatado uma considerável variabilidade no volume de vazios (VV) dos corpos-de-prova analisados neste trabalho e dado a grande importância desta variável no comportamento mecânico das misturas asfálticas, optou-se por referenciar os resultados de RT obtidos conjuntamente com os valores de VV de cada corpo-de-prova. Verifica-se, a partir da análise da Tabela 4.1, uma redução na RT com o acréscimo de VV, como era esperado.

Conforme mencionado no item 3.4.3, os corpos-de-prova foram distribuídos de maneira a contemplar valor médio de VV para cada grupo de ensaios de aproximadamente 3,0%, nas

misturas de CA-C, e de aproximadamente 4,0%, nas misturas de CA-AB. Desta forma, toma-se o valor médio de RT de cada grupo para caracterização do mesmo.

A instrumentação do prato da prensa indicou velocidade estável durante o ensaio, de 0,8mm/s, com leve queda para 0,70mm/s durante o pico de carregamento nos ensaios realizados a 10°C, cujos carregamentos excederam os 30kN.

Com o sistema de medição utilizado, foi possível proceder à determinação do deslocamento horizontal até a ruptura. A Figura 4.1 mostra o resultado de um ensaio de RT realizado a 10°C; a Figura 4.2, o resultado de um ensaio a 25°C; e a Figura 4.3, um resultado a 35°C. Percebe-se uma rápida queda da carga no ensaio de 10°C indicando rupturas predominantemente frágeis. No ensaio realizado sob 35°C nota-se que o alívio do carregamento acontece de maneira mais suave indicando rupturas tipo dúctil. À temperatura de 25°C o comportamento foi intermediário entre as outras duas temperaturas discutidas.

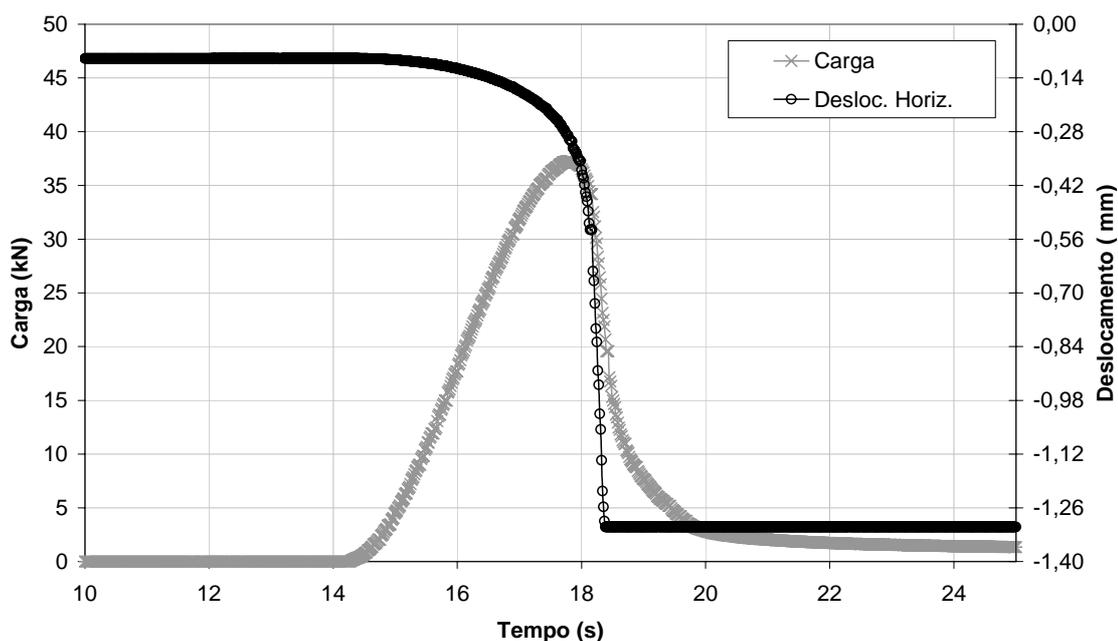
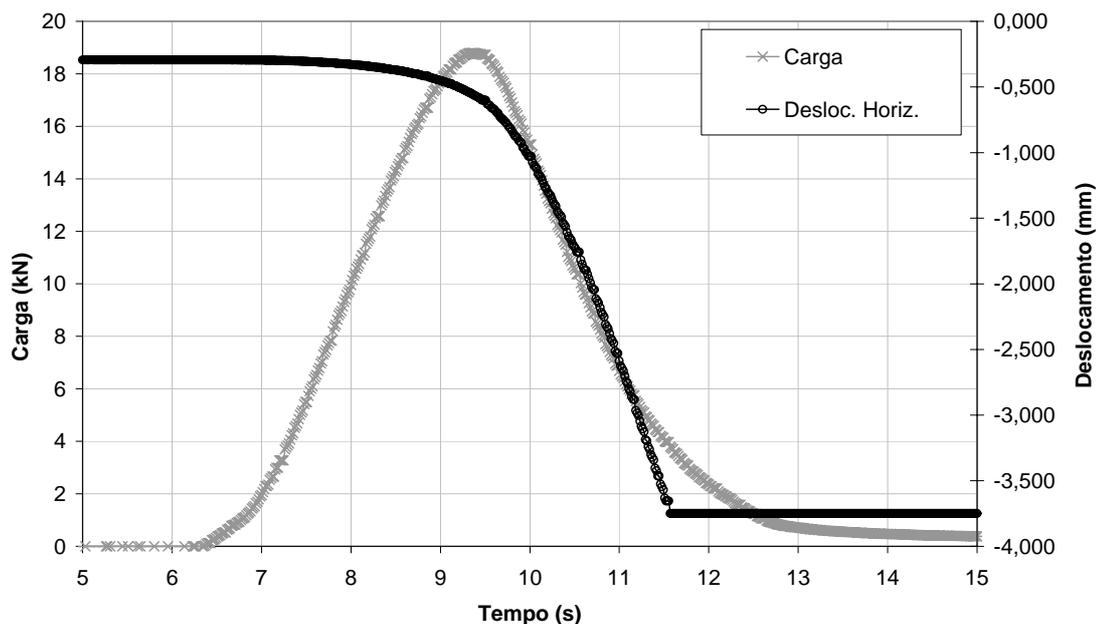
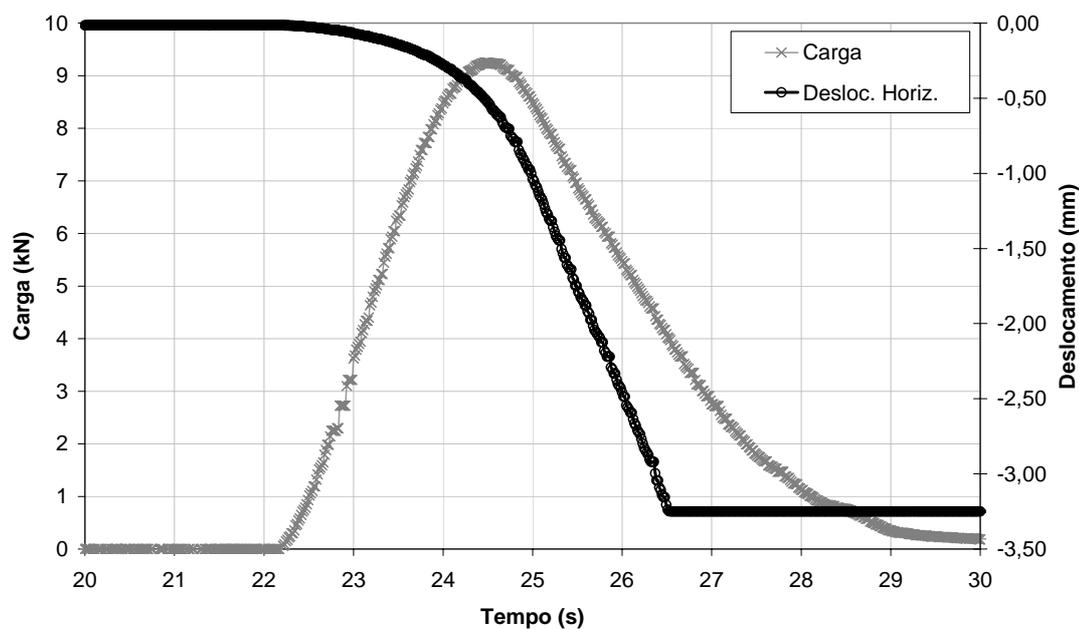


Figura 4.1 – Gráfico carga *versus* deslocamento em um ensaio de RT a 10°C

Figura 4.2 – Gráfico carga *versus* deslocamento em um ensaio de RT a 25°CFigura 4.3 – Gráfico carga *versus* deslocamento em um ensaio de RT a 35°C

De acordo com Kim e Wen (2002) as magnitudes dos deslocamentos devido ao abaulamento nos corpos-de-prova durante um ensaio de tração indireta são muito pequenas se comparadas aos deslocamentos na tensão de ruptura, podendo estas ser desconsideradas. Executou-se em conjunto com as análises realizadas neste trabalho para determinação das equações de correção pelo efeito de abaulamento, apresentado no item 3.3.2, uma verificação da magnitude desta correção. Os valores encontrados de correção ficaram abaixo de 5%, conforme a proposição de Kim e Wen (2002). Desta forma, nenhuma correção devido ao

efeito de abaulamento foi executada para correção dos deslocamentos horizontais mobilizados até a ruptura das amostras nos ensaios de RT.

A Tabela 4.2 registra um resumos dos deslocamentos horizontais mobilizados até a ruptura no ensaio de RT. Evidencia-se um aumento dos deslocamentos com o aumento da temperatura de ensaio como era de se esperar. As amostras de CA-C e CA-AB apresentaram valores de deslocamentos horizontais mobilizados próximos na temperatura de 10°C, ainda que a RT determinada para a mistura CA-C tenha sido 27% superior à da RT média da mistura de CA-AB. Nas temperaturas de 25° e 35°C a mistura de asfalto borracha apresentou tais deslocamentos menores em comparação aos obtidos para a mistura de concreto asfáltico convencional, ainda que o RT médio das misturas nas temperaturas citadas tenham sido próximos.

Tabela 4.2 – Deslocamentos horizontais mobilizados até a ruptura no ensaio de RT (mm)

| | | | | | <i>Média</i> |
|--------------|-------------|-------|-------|-------|--------------|
| CA-C | 10°C | 0,175 | 0,283 | 0,112 | 0,190 |
| | 25°C | 0,327 | 0,524 | 0,355 | 0,402 |
| | 35°C | 0,504 | 0,540 | 0,562 | 0,536 |
| | | | | | |
| CA-AB | 10°C | 0,216 | 0,185 | 0,172 | 0,191 |
| | 25°C | 0,173 | 0,300 | 0,360 | 0,278 |
| | 35°C | 0,353 | * | 0,611 | 0,482 |

* Valor perdido por erro de gravação de dados

Há alguns estudos que investigam a correlação entre a energia de fratura mobilizada durante o ensaio de RT, medido a partir do gráfico tensão-deformação (exemplificado na Tabela 4.4), com parâmetros de fadiga das misturas asfálticas. Hugo e Nachenius (1989) e Kim e Wen (2002) fizeram avanços sobre este tema. Há, entretanto, uma série de considerações sobre as características da mistura que não puderam ser realizadas para que tais parâmetros pudessem ser considerados. Ainda assim, apresentam-se os valores medidos sob a área dos gráficos tensão *versus* deformação para os corpos-de-prova ensaiados na Tabela 4.2.

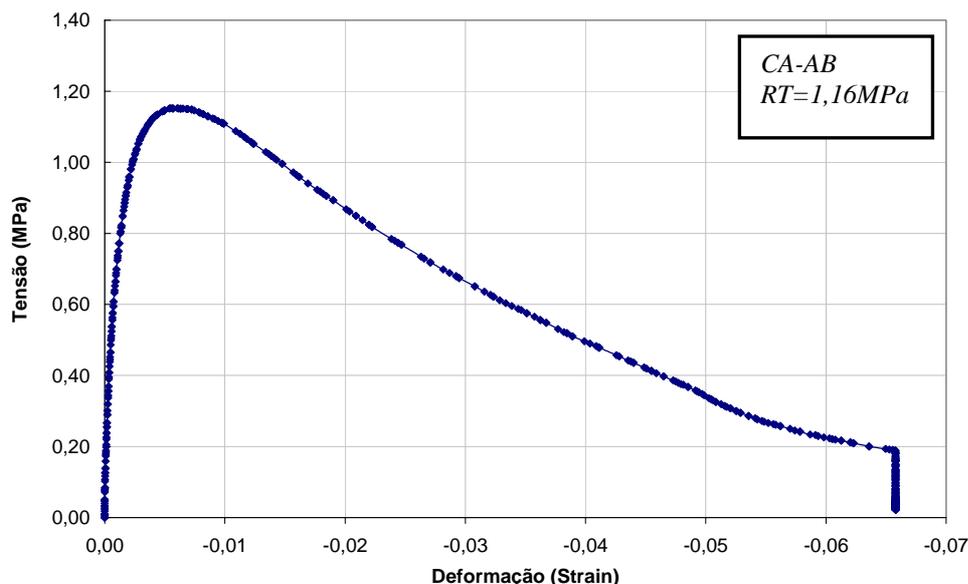


Figura 4.4 – Gráfico tensão-deformação de um ensaio de RT a 35°C (CP1A)

Tabela 4.3 – Área dos gráficos tensão *versus* deformação (MPa).

| | | | | |
|-------|------|---------|-------|-------|
| CA-C | 10°C | 0,305 | 0,264 | 0,277 |
| | 25°C | 0,156 | 0,140 | 0,117 |
| | 35°C | 0,082 | 0,074 | 0,051 |
| CA-AB | 10°C | 0,285 | 0,254 | 0,194 |
| | 25°C | 0,147 | 0,132 | 0,098 |
| | 35°C | 0,065** | * | 0,049 |

* Valor perdido por erro de gravação de dados

** Valor obtido da curva apresentada na Figura 4.4

Os resultados apresentados na Tabela 4.3 são úteis na identificação de algumas importantes diferenças entre os ligantes utilizados em termos de sua capacidade de resistência à deformação de tração. Esta metodologia, apresentada por Hugo e Nachenius (1989) não resulta, entretanto, sobre previsões de desempenho a longo prazo.

Percebe-se que, para as temperaturas estudadas, todos os corpos-de-prova de CA-AB apresentaram menor área nos gráficos tensão-deformação obtidos a partir dos ensaios de RT. Isto pode ser devido ao VV médio desta mistura (4%) ter sido maior que o da mistura de CA-C (VVmédio = 3,0%). O efeito do VV sob este comportamento pode ser evidenciado a partir da análise das amostras em cada grupo. Assim como apresentado na Tabela 4.1 as amostras 1,2,3 estão em ordem crescente de VV. Depreende-se daí que há uma redução na área do gráfico tensão-deformação para aumentos de VV.

4.2 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE POISSON

A pesquisa 1-28 e 1-28A do NCHRP, sugere que sejam medidos um total de oito valores de coeficiente de Poisson, que para a temperatura de 25°C devem ficar dentro do intervalo de 0,25 e 0,45. As determinações devem ser feitas como segue:

- “ ν ” a partir da face 1 e da face 2 do corpo-prova;
- “ ν ” instantâneo e “ ν ” total (obtidos a partir dos deslocamentos resilientes instantâneos e totais, respectivamente);
- “ ν ” medido a partir de um plano α e a partir de um plano $\alpha+90^\circ$ (não determinado neste trabalho devido à não intercambialidade dos LVDTs utilizados).

A seguir apresentam-se os valores de coeficiente de Poisson determinados em função dos deslocamentos calculados tanto a partir dos dados obtidos sem correção de abaulamento, quanto a partir dos dados corrigidos, conforme os modelos propostos no item 3.3.2.

Apresenta-se ainda, valores de Poisson determinados a partir dos deslocamentos resilientes calculados como função do algoritmo proposto pelo Protocolo P07 quanto pelo algoritmo proposto pela pesquisa 1-28 e 1-28^a do NCHRP.

Para sua determinação, utilizou-se em todas as situações a equação 3.3, apresentada no item 3.3.1.

a) Determinação do coeficiente de Poisson a partir do algoritmo proposto pelo Protocolo-P07

Conforme constatado por Barksdale *et al.* (1997) a determinação experimental do coeficiente de Poisson no ensaio de compressão diametral por cargas repetidas, apresenta dispersões. Acredita-se que muito desta variabilidade possa ser devida à desconsideração do efeito de abaulamento quando da determinação dos deslocamentos resilientes. A Figura 4.5 mostra os valores determinados de coeficiente de Poisson, a partir dos deslocamentos resilientes calculados segundo o Protocolo P07, sem consideração de abaulamento, para todos os ensaios de MR realizados, a saber:

- MR@10/25/35°C (1Hz; 0,10 seg; 15%)
- MR@10*/25/35°C (1Hz; 0,10 seg; 30%)
- MR@10*/25/35°C (1Hz; 0,10 seg; 40%)

- MR@10/25/35°C (3Hz; 0,10 seg; 15%)
- MR@10/25/35°C (5Hz; 0,10 seg; 15%)
- MR@10/25/35°C (1Hz; 0,15 seg; 15%)
- MR@10/25/35°C (1Hz; 0,20 seg; 15%) - Pulso de carga tipo “quadrado”
- MR@10/25/35°C (1Hz; 0,20 seg; 15%) - Pulso de carga tipo semi-seno-verso

*Na temperatura de 10°C, usaram-se níveis de 10 e 20%RT, conforme citado no item 3.1.1c)

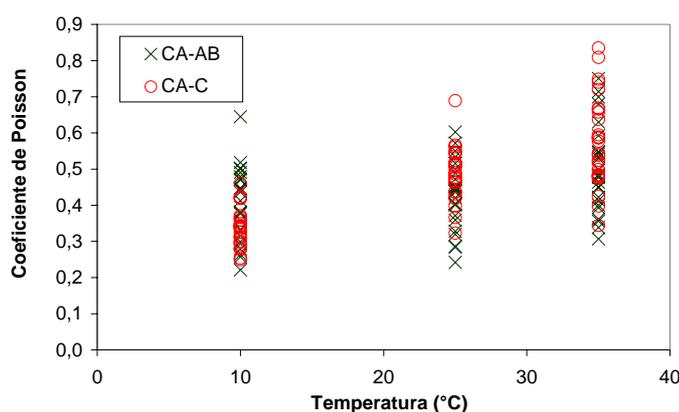


Figura 4.5 – “v” calculado segundo Protocolo P07 – sem correção do efeito de abaulamento

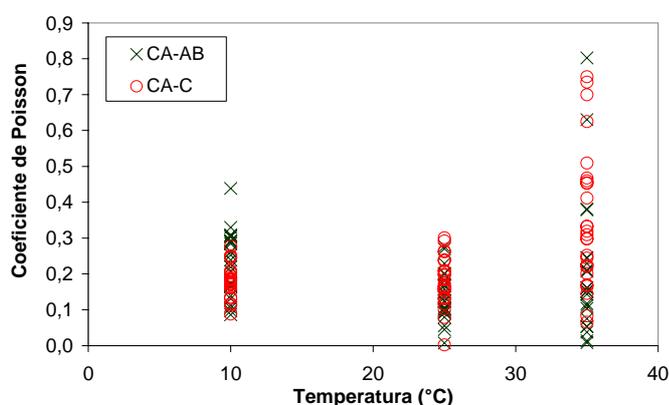


Figura 4.6 – “v” calculado segundo Protocolo P07 –efeito de abaulamento corrigido

A Figura 4.6 mostra os valores de coeficiente de Poisson determinados a partir dos deslocamentos resilientes calculados segundo o Protocolo P07 corrigidos pelo efeito de abaulamento segundo os modelos propostos no item 3.3.2.

Observa-se uma coerência maior nos resultados para o segundo caso (abaulamento corrigido), nas temperaturas de 10° e 25°, tendo os valores de ν ficado dentro do limite admissível, abaixo de 0,5 (limite teórico do coeficiente de Poisson para materiais elásticos lineares isotrópicos). Para a temperatura de 35°C os valores também apresentaram um valor médio

bastante mais razoável do que aqueles calculados sem consideração do efeito de abaulamento, mas ainda apresentando resultados acima de 0,5.

Os valores acima de 0,5 para a mistura de CA-AB, dos resultados apresentados na Figura 4.6, foram originados de ensaios a 5Hz, 35°C, duas ocorrências, e com pulso de carga de forma quadrado e tempo de 0,20s, uma evidência.

Os valores acima de 0,5 para a mistura de CA-C, dos resultados apresentados na Figura 4.6, foram originados de ensaios de 3 e 5Hz, 35°C, 5 ocorrências, e com pulso de carga de forma quadrado e tempo 0,20s, uma ocorrência.

A Tabela 4.4 mostra os valores médios de coeficiente de Poisson obtidos para as misturas de CA-C e CA-AB no ensaio de MR sob temperatura de 25°C, frequência de 1Hz, pulso de carga de 0,10s (tipo semi-seno-verso) e 15% da RT utilizada para solicitação do corpo-de-prova durante o ensaio. Os valores apresentados estão baseados nos resultados de deslocamentos obtidos através do algoritmo proposto pelo Protocolo P07 e posteriormente corrigidos quanto ao efeito de abaulamento.

Tabela 4.4 – Valores médios de ν obtidos para MR@35,25,10°C (1Hz;0,10;15%)

| | <i>CA-C</i> | | | <i>CA-AB</i> | | |
|----------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| | 35 | 25 | 10 | 35 | 25 | 10 |
| | 0,30 | 0,21 | 0,13 | 0,23 | 0,11 | 0,15 |
| | 0,33 | 0,10 | 0,17 | 0,07 | 0,12 | 0,26 |
| | 0,17 | 0,08 | 0,18 | 0,10 | 0,10 | 0,16 |
| <i>Média</i> | 0,27 | 0,13 | 0,16 | 0,13 | 0,11 | 0,19 |
| <i>Desvpad</i> | 0,09 | 0,07 | 0,02 | 0,08 | 0,01 | 0,06 |

b) Determinação do coeficiente de Poisson a partir do algoritmo proposto pela pesquisa NCHRP 1-28/1-28A

Os valores de coeficiente de Poisson instantâneos determinados a partir dos deslocamentos resilientes instantâneos, calculados segundo o algoritmo proposto pela pesquisa NCHRP 1-28/1-28A, estão apresentados na Figura 4.7. A Figura 4.8 ilustra os valores de coeficiente de Poisson total, determinados a partir dos deslocamentos resilientes totais segundo o mesmo algoritmo. Ressalva-se que as figuras citadas apresentam resultados sem correção por efeito de abaulamento. Salienta-se, ainda, que os dados referentes aos ensaios de 3Hz e 5Hz não

estão contemplados neste item, uma vez que não foi possível utilizar o algoritmo proposto pela pesquisa 1-28/1-28A, preparado apenas para ensaios realizados a 1Hz.

A Figura 4.9 e Figura 4.10 apresentam os resultados de coeficiente de Poisson instantâneo e total, segundo o mesmo algoritmo, porém com as correções devido ao efeito de abaulamento segundo os modelos propostos no item 3.3.2.

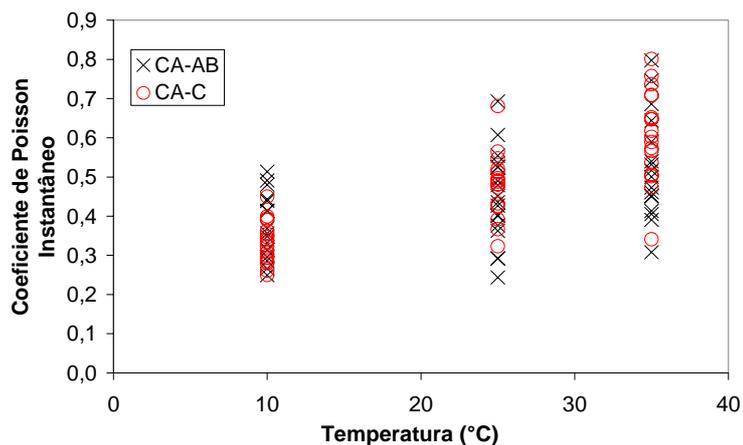


Figura 4.7 – “ ν ” instantâneo calculado segundo a Pesquisa 1-28/1-28A – sem correção do efeito de abaulamento

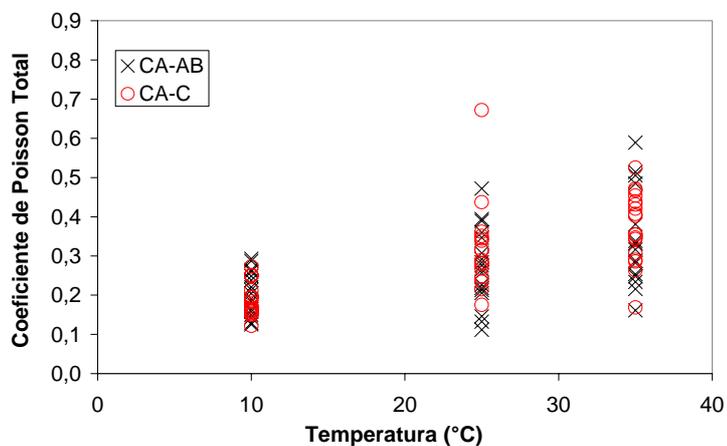


Figura 4.8 – “ ν ” total calculado segundo a Pesquisa 1-28/1-28A – sem correção do efeito de abaulamento

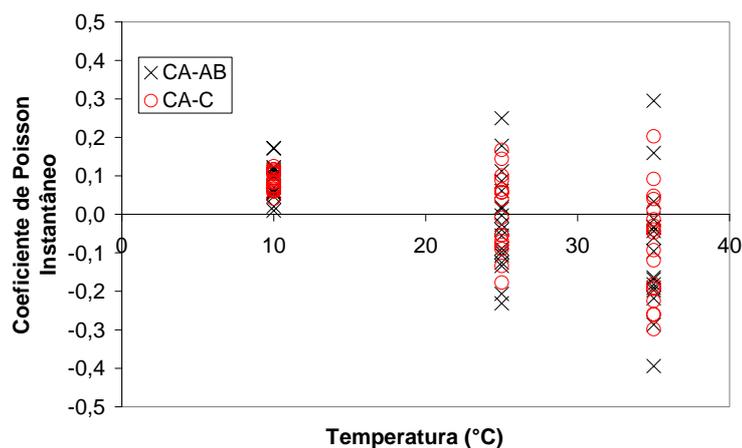


Figura 4.9 – “ ν ” instantâneo calculado segundo a Pesquisa 1-28/1-28A – efeito de abaulamento corrigido

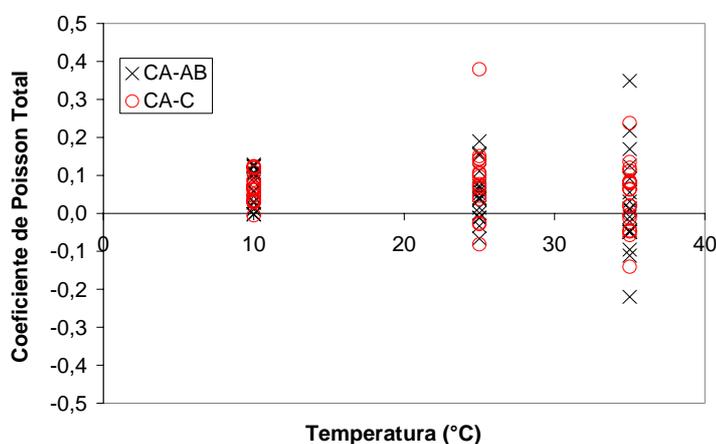


Figura 4.10 – “ ν ” total calculado segundo a Pesquisa 1-28/1-28A – efeito de abaulamento corrigido

Os resultados apresentados nas Figura 4.7 e Figura 4.8, sem correção de efeito de abaulamento estão apresentados para efeito comparativo com os resultados obtidos após a correção, que estão apresentadas na Figura 4.9 e Figura 4.10. Verifica-se que os valores resultantes da correção de abaulamento levam a determinação de coeficientes negativos nas temperaturas de 25°C e 35°C, o que, para materiais elástico-lineares, significaria dizer que houve uma extensão do plano vertical comprimido e uma compressão do plano horizontal tracionado, o que é, para o ensaio em questão, irreal.

Na temperatura de 10°C, por outro lado, a correção levou a valores mais compatíveis com o esperado – ν pode ser considerado igual a 0,21 para a temperatura de 10°C, segundo Marques (2004). Atribui-se a isto o fato das misturas asfálticas a 10°C apresentarem parcelas de deslocamento elásticos maiores do que as parcelas visco-elásticas ou plásticas; desta forma, a

correção, baseada em uma análise feita considerando-se um material elástico-linear isotrópico, ser muito mais representativa.

A Tabela 4.5 apresenta um resumo dos valores de coeficientes de Poisson total e instantâneo determinados a partir dos deslocamentos resilientes obtidos segundo o algoritmo de cálculo da pesquisa NCHRP 1-28/1-28A. São registrados os valores dos ensaios realizados sob temperatura de 10°, 25° e 35°C a 1Hz, pulso de carga tipo semi-seno-verso com 0,10s de duração e com os percentuais de RT% anotados na tabela.

Tabela 4.5 – Resumo dos coeficientes de Poisson total e instantâneos obtidos para MR@25 (1Hz;0,10) calculados segundo a pesquisa 1-28/1-28A

| | | CA-AB | | CA-C | | CA-AB | | CA-C | |
|-----------|-----|---------------|-------------|---------------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|
| | | v instantâneo | | v instantâneo | | v total | | v total | |
| T(°C) | %RT | 15 | 40 | 15 | 40 | 15 | 40 | 15 | 40 |
| 35 | | -0,04 | 0,16 | -0,09 | 0,04 | 0,03 | 0,22 | -0,01 | 0,11 |
| 35 | | -0,16 | 0,03 | 0,01 | 0,20 | -0,10 | 0,09 | 0,08 | 0,24 |
| 35 | | -0,19 | 0,30 | -0,12 | 0,09 | -0,11 | 0,35 | -0,06 | 0,14 |
| Media | | -0,13 | 0,16 | -0,07 | 0,11 | -0,06 | 0,22 | 0,00 | 0,16 |
| Desv. Pad | | 0,08 | 0,13 | 0,07 | 0,08 | 0,08 | 0,13 | 0,07 | 0,07 |

| | | CA-AB | | CA-C | | CA-AB | | CA-C | |
|-----------|-----|---------------|-------------|---------------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|
| | | v instantâneo | | v instantâneo | | v total | | v total | |
| T(°C) | %RT | 15 | 40 | 15 | 40 | 15 | 40 | 15 | 40 |
| 25 | | -0,03 | 0,18 | -0,08 | 0,09 | 0,02 | 0,16 | -0,03 | 0,13 |
| 25 | | 0,00 | 0,25 | -0,13 | 0,06 | 0,04 | 0,15 | -0,08 | 0,07 |
| 25 | | -0,09 | 0,09 | -0,07 | 0,10 | -0,07 | 0,05 | -0,03 | 0,10 |
| Media | | -0,04 | 0,17 | -0,09 | 0,08 | 0,00 | 0,12 | -0,05 | 0,10 |
| Desv. Pad | | 0,04 | 0,08 | 0,03 | 0,02 | 0,06 | 0,06 | 0,03 | 0,03 |

| | | CA-AB | | CA-C | | CA-AB | | CA-C | |
|-----------|-----|---------------|-------------|---------------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|
| | | v instantâneo | | v instantâneo | | v total | | v total | |
| T(°C) | %RT | 15 | 20 | 15 | 20 | 15 | 20 | 15 | 20 |
| 10 | | 0,15 | 0,17 | 0,08 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,03 | 0,05 |
| 10 | | 0,12 | 0,12 | 0,07 | 0,12 | 0,08 | 0,06 | 0,03 | 0,06 |
| 10 | | 0,17 | 0,11 | 0,13 | 0,08 | 0,12 | 0,06 | 0,07 | 0,05 |
| Media | | 0,15 | 0,13 | 0,09 | 0,10 | 0,10 | 0,07 | 0,04 | 0,05 |
| Desv. Pad | | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,01 |

Percebe-se pela análise da tabela, que os valores de ν mais próximos dos valores de referência são aqueles obtidos a partir dos deslocamentos totais e com níveis de tensão de ensaio mais

elevados. Atribui-se isto ao fato de a magnitude dos deslocamentos totais serem consideravelmente maiores, uma vez que considera tanto a parcela de recuperação elástica instantânea quanto a parcela de deslocamento tempo-dependente e, portanto, menos suscetível a erros de medida devido ao efeito de abaulamento. Associa-se a isto, níveis maiores de tensão no ensaio, proveniente de um maior percentual de RT utilizado no carregamento, que elevam também a magnitude dos deslocamentos lidos.

c) Discussão sobre a determinação do coeficiente de Poisson

Conclui-se das análises anteriormente apresentadas que, para todos os casos, assim como já observado por Barksdale *et al.* (1997), a determinação experimental do coeficiente de Poisson nos ensaios de compressão diametral cíclica apresenta considerável variabilidade.

Acredita-se que o efeito de abaulamento foi considerável e que necessita correção para determinação dos deslocamentos resilientes. A correção efetuada foi proveniente de uma análise realizada através do MEF com a consideração de sólido elástico linear e carregamento estático. Desta forma, acredita-se que possivelmente as correções por abaulamento possam ter sido maiores do que aquela que ocorre de fato durante o ensaio.

Como a magnitude dos deslocamentos horizontais é menor, fica esta mais suscetível a majorações do erro. Adiciona-se a isto, o fato de as correções horizontais serem decréscimos, enquanto que as correções de deslocamento vertical são acréscimos aos valores lidos. Desta forma, pequenos erros de correção levam a uma divergência nos valores de Poisson. Sem esta correção, entretanto, percebeu-se que os erros são ainda maiores.

Dentre os algoritmos analisados para determinação dos deslocamentos resilientes, aquele que levou a resultados de coeficiente de Poisson mais próximos dos valores de referência é o apresentado pelo Protocolo P07.

Da análise da Figura 2.22, apresentada no Capítulo 2, verifica-se que os deslocamentos totais determinados em função do algoritmo proposto pela pesquisa 1-28/1-28A, são maiores do que os calculados a partir do algoritmo proposto pelo Protocolo P07. Esperar-se-ia, portanto, que a determinação menos suscetível a erros do coeficiente de Poisson fosse aquela feita com o uso do deslocamento resiliente total (coeficiente de Poisson total), obtido a partir do algoritmo proposto pela pesquisa 1-28/1-28A.

Atribui-se, entretanto, a metodologia de correção aplicada esta diferença. Durante a determinação da correção dos deslocamentos, tem-se um processo iterativo, que segue os seguintes passos:

- A partir dos deslocamentos verticais e horizontais lidos e também da carga registrada no ensaio, determinam-se MRs em função de coeficientes de Poisson arbitrados (0,21 para ensaios realizados a 10°C, 0,35 para 25°C e 0,42 para 35°C.)
- Dos MRs obtidos, em função do deslocamento vertical e em função do deslocamento horizontal, escolhe-se aquele menos suscetível a erros. No caso estudado, os deslocamentos verticais estão menos expostos ao efeito de abaulamento e por consequência resultam em MR mais próximos daqueles determinados após a correção; são, portanto, os escolhidos para iniciar o processo iterativo.
- Para a correção dos deslocamentos obtidos a partir do algoritmo P07 utilizou-se o MR em função dos deslocamentos verticais $[\text{MR}-f(\Delta_{vt})_{P07}]$. Para a correção dos deslocamentos obtidos a partir do algoritmo da pesquisa 1-28/1-28A, optou-se pelo MR determinado em função dos deslocamentos verticais totais $[\text{MR}-f(\Delta_{vt})_{1-28}]$. Daí, 2 iterações foram realizadas para determinação das correções.

Como o $\text{MR}-f(\Delta_{vt})_{1-28}$ é menor do que o $\text{MR}-f(\Delta_{vt})_{P07}$, dado a natureza de determinação dos deslocamentos preconizados pelos respectivos algoritmos de cálculo, isto resultou em correções maiores aos deslocamentos determinados segundo a pesquisa 1-28/1-28A. Daí a possível explicação para a determinação do coeficiente de Poisson ter sido mais adequado a partir das recomendações do Protocolo P07.

4.3 ANÁLISE PARAMÉTRICA DO ENSAIO DE MR

O objetivo da análise paramétrica executada foi de avaliar a variabilidade do módulo de resiliência em função da variação do tempo e da forma do pulso de carga, do período de descanso, analisado pela variação na frequência de carregamento, da carga usada durante o ensaio e da análise matemática do pulso de deslocamento. Verificou-se ainda a resposta destas variáveis quando submetidas a três diferentes temperaturas, 10°, 25° e 35°C.

Como já houve uma considerável variação no volume de vazios nos corpos-de-prova testados (variável não controlada) e para que se tivesse uma fonte a menos de interferência nos resultados da análise paramétrica realizada, optou-se por considerar valores de coeficiente de

Poisson arbitrados, baseado na bibliografia consultada, ao invés daqueles medidos diretamente no corpo-de-prova. Esta escolha foi feita devido à variabilidade dos resultados de determinação do coeficiente de Poisson, apresentada no item anterior, 4.2.

Tendo em vista que o objetivo da análise paramétrica é a de identificar a existência ou não de variação no MR pelo efeito do parâmetro estudado, fica assim mais evidente tal efeito fazendo-se a consideração mencionada do coeficiente de Poisson. Registra-se, ainda, o fato de que os poucos são os ensaios realizados no Brasil com medição de ν , ficando assim, mais representativo da prática usual de ensaio, tal consideração.

Os coeficientes de Poisson arbitrados foram baseados na norma ASTM D-4123 e na proposição de Barksdale *et al.* (1997). As referências citadas indicam que para a temperatura de 25°, o coeficiente de Poisson de misturas asfálticas pode ser assumido como 0,35, tendo sido este o valor adotado por esta pesquisa para os ensaios realizados nesta temperatura.

Para os ensaios de MR sob temperaturas de 10°C e 35°C, Marques (2004) sugere que sejam interpolados os valores de coeficiente de Poisson propostos por Barksdale *et al.* (1997). Este sugere valores de 0,2 para ensaios a 5°C; 0,35 para ensaios a 25°C; e 0,5 para ensaios realizados sob temperatura de 40°C. Resulta desta interpolação $\nu=0,21$ para os ensaios realizados sob 10°C e $\nu=0,42$ para 35°C, que foram os valores adotados nesta pesquisa.

As análises estatísticas apresentadas foram realizadas com uso do programa computacional Microsoft Excel ® através de análises de variância (ANOVA) com fator duplo. Para todos os casos analisados, um dos fatores foi a temperatura; o outro, refere-se ao efeito em estudo, a saber, pulso de carga, frequência, nível de carga (%RT) ou forma do pulso de carga. Todas as análises apresentam 2 graus de liberdade (3 corpos-de-prova por ensaio).

As médias e desvios-padrão dos resultados apresentados graficamente a seguir, encontram-se planilhados no Anexo C.

4.3.1 Variação do MR em função do tempo de pulso de carga

Os resultados a seguir apresentados foram determinados a partir de ambos os algoritmos de cálculo estudados na pesquisa, Protocolo P07 e pesquisa NCHRP 1-28/1-28A, para viabilizar a análise de seus desempenhos frente às variações impostas nos ensaios. Uma análise

complementar realizada durante a avaliação propostas neste item foi a verificação do cálculo de MR tanto a partir dos deslocamentos horizontais quanto verticais. Os ensaios apresentados a seguir foram realizados à frequência de 1Hz e 15% da RT com pulso de carga tipo semi-seno-verso.

Análise do MR de amostras de CA-AB em função dos deslocamentos horizontais

As Figura 4.11 e a Figura 4.12 mostram a análise dos resultados obtidos, calculado a partir dos deslocamentos horizontais para a mistura de asfalto borracha; na primeira estão apresentados os resultados calculados segundo o Protocolo P07 enquanto no segundo, os resultados segundo o algoritmo proposto pela pesquisa 1-28/1-28A. Os níveis de variação do tempo do pulso de carga foram de 0,10s, 0,15s, 0,20s. A Tabela 4.6 registra a análise de variância determinada para avaliação dos resultados apresentados.

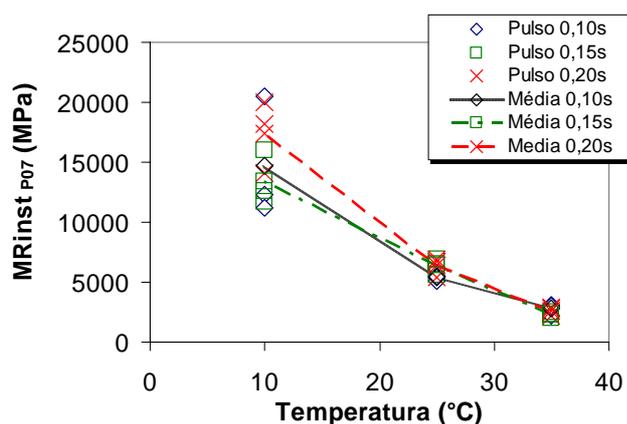


Figura 4.11– MR_{iP07} em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos horizontais (CA-AB)

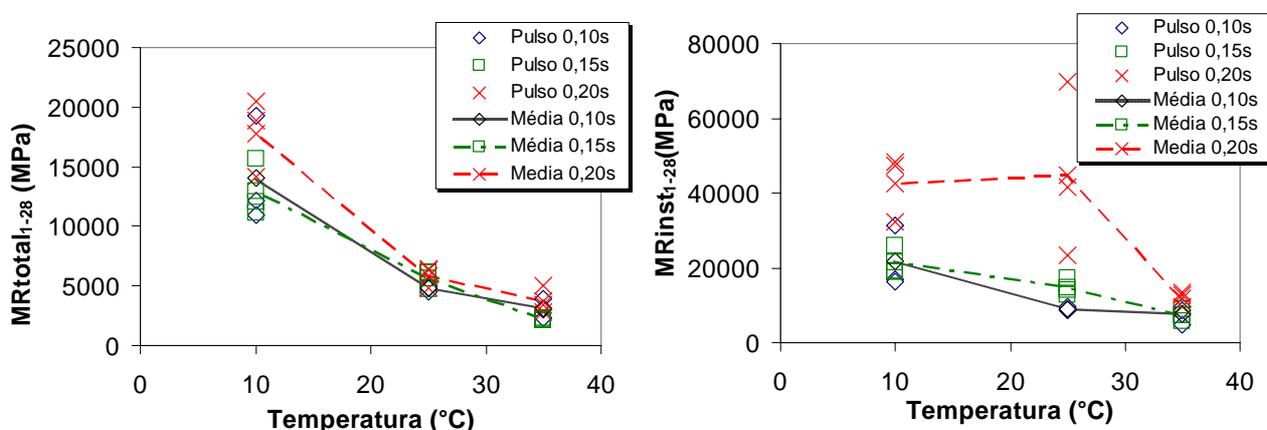


Figura 4.12 – MR_{i1-28} MR_{t1-28} em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos horizontais (CA-AB)

Tabela 4.6 – ANOVA realizada para os resultados de MR em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos horizontais (CA-AB)

| Fonte da variação | gl | MR_{iP07} | | MRT_{1-28} | | MR_{i1-28} | |
|-------------------|----|-------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|
| | | F | F crítico | F | F crítico | F | F crítico |
| Temperatura | 2 | 82,56 | 3,55 | 79,99 | 3,55 | 11,20 | 3,55 |
| Pulso de carga | 2 | 1,19 | 3,55 | 2,79 | 3,55 | 14,16 | 3,55 |
| Interações | 4 | 0,89 | 2,93 | 1,08 | 2,93 | 2,66 | 2,93 |

Análise do MR de amostras de CA-AB em função dos deslocamentos verticais

A Figura 4.13 e Figura 4.14 apresentam as análises MR em função de tempo de pulso de carga e temperatura determinados a partir dos deslocamentos verticais para a mistura de CA-AB. A Tabela 4.7 mostra a análise de variância obtida para estes resultados.

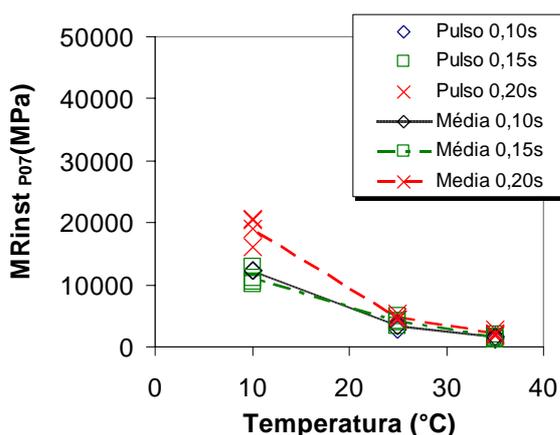


Figura 4.13 – MR_{iP07} em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos verticais (CA-AB)

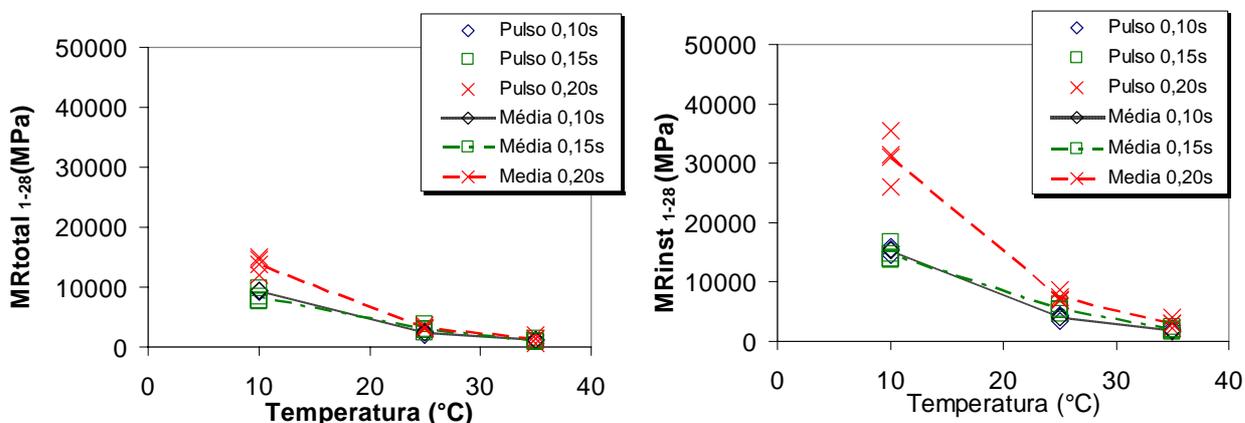


Figura 4.14 – MR_{i1-28} MRT_{1-28} em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos verticais (CA-AB)

Tabela 4.7 – ANOVA realizada para os resultados de MR em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos verticais (CA-AB)

| Fonte da variação | gl | MR _{iP07} | | MR _{t1-28} | | MR _{i1-28} | |
|-------------------|----|--------------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|
| | | F | F crítico | F | F crítico | F | F crítico |
| Temperatura | 2 | 340,44 | 3,55 | 395,56 | 3,55 | 121,96 | 3,55 |
| Pulso de carga | 2 | 22,85 | 3,55 | 19,46 | 3,55 | 5,36 | 3,55 |
| Interações | 4 | 12,78 | 2,93 | 12,94 | 2,93 | 3,94 | 2,93 |

Análise do MR de amostras de CA-C em função dos deslocamentos horizontais

A Figura 4.15 e Figura 4.16 ilustram os resultados das análises realizadas para avaliação do nível de interação entre MR, determinados a partir dos dois algoritmos em estudo, com o tempo do pulso de carga e a temperatura nas misturas de CA-C, com base nas leituras de deslocamentos horizontais. Tabela 4.8

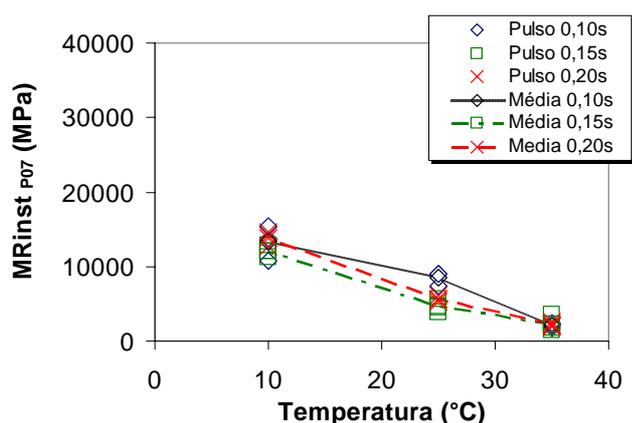


Figura 4.15 – MR_{iP07} em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos horizontais (CA-C)

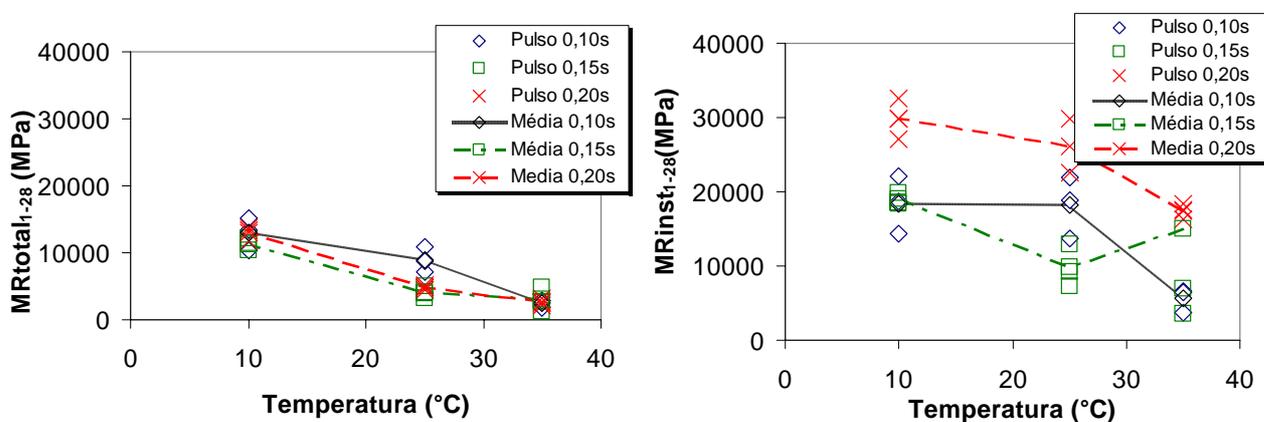


Figura 4.16 – MR_{i1-28} MR_{t1-28} em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos horizontais (CA-C)

Tabela 4.8 – ANOVA realizada para os resultados de MR em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos horizontais (CA-C)

| Fonte da variação | gl | MR_{iP07} | | MRT_{1-28} | | MR_{i1-28} | |
|-------------------|----|-------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|
| | | F | F crítico | F | F crítico | F | F crítico |
| Temperatura | 2 | 224,59 | 3,55 | 286,11 | 3,55 | 5,31 | 3,55 |
| Pulso de carga | 2 | 5,20 | 3,55 | 9,33 | 3,55 | 7,42 | 3,55 |
| Interações | 4 | 3,45 | 2,93 | 16,10 | 2,93 | 1,65 | 2,93 |

Análise do MR de amostras de CA-C em função dos deslocamentos verticais

A Figura 4.17 e Figura 4.18 apresentam as análises MR em função de tempo de pulso de carga e temperatura determinados a partir dos deslocamentos verticais para a mistura de CA-C. A Tabela 4.9 mostra a análise de variância obtida para estes resultados.

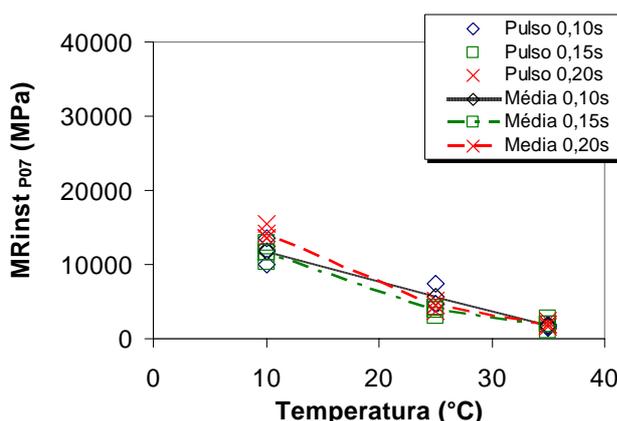


Figura 4.17 – MR_{iP07} em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos verticais (CA-C)

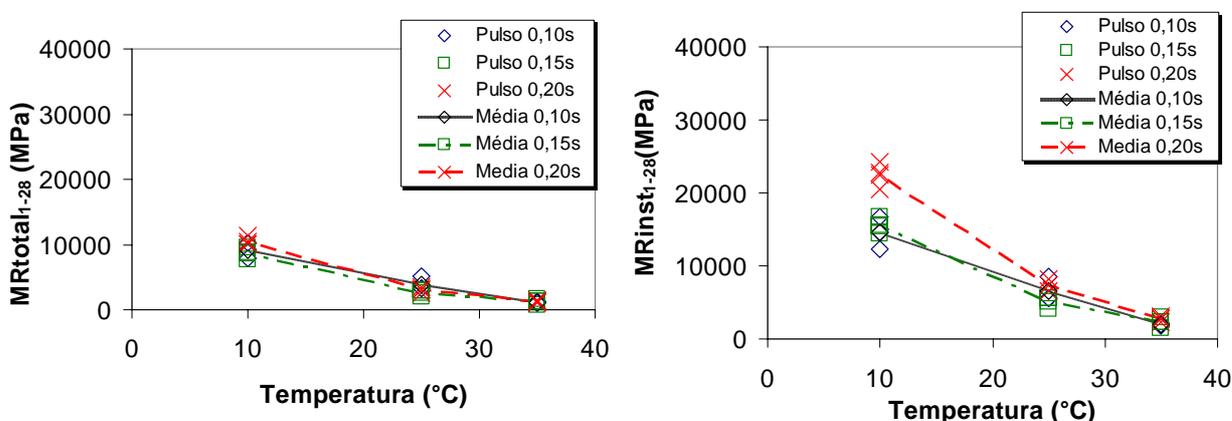


Figura 4.18 – MR_{i1-28} MRT_{1-28} em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos verticais (CA-C)

Tabela 4.9 – ANOVA realizada para os resultados de MR em função do tempo do pulso de carga, determinado a partir dos deslocamentos verticais (CA-C)

| <i>Fonte da variação</i> | <i>gl</i> | <i>MRi_{p07}</i> | | <i>Mrt₁₋₂₈</i> | | <i>MRi₁₋₂₈</i> | |
|--------------------------|-----------|--------------------------|------------------|---------------------------|------------------|---------------------------|------------------|
| | | <i>F</i> | <i>F crítico</i> | <i>F</i> | <i>F crítico</i> | <i>F</i> | <i>F crítico</i> |
| Temperatura | 2 | 242,75 | 3,55 | 314,66 | 3,55 | 333,36 | 3,55 |
| Pulso de carga | 2 | 2,28 | 3,55 | 2,65 | 3,55 | 18,53 | 3,55 |
| Interações | 4 | 2,53 | 2,93 | 2,53 | 2,93 | 8,70 | 2,93 |

Discussão da sensibilidade do MR e dos algoritmos de determinação dos deslocamentos resilientes em relação à variação do tempo do pulso de carga

Percebe-se, da análise dos resultados apresentados para os corpos-de-prova de concreto asfáltico com adição de borracha (CA-AB) que a variação no tempo do pulso de carga resulta em variação nos valores de MR. Evidencia-se também uma dependência do módulo de resiliência à temperatura, o que já era previsto, e ainda uma dependência aos algoritmos utilizados na determinação dos deslocamentos resilientes.

Tanto nas análises realizadas considerando-se os deslocamentos horizontais quanto na análise que considerou os deslocamentos verticais para determinação do MR, para a mistura CA-AB, o MR em função de um pulso de 0,20s apresentou valores em média 25% maiores. Os módulos determinados com aplicação de pulsos de 0,10 e 0,15s, apresentaram comportamento semelhante. Da análise das Figuras 4.1 a 4.14, conclui-se que as variações de MR com o tempo de pulso de carga são mais evidentes nas baixas temperaturas – correspondente aos mais altos valores de MR.

Observa-se das análises de variância apresentadas na Tabela 4.6, que o parâmetro temperatura apresentou $F > F_{crít}$ para as três variantes de MR determinadas, indicando uma forte correlação deste parâmetro. Já em relação ao pulso de carga, apenas em relação ao MRi_{1-28} esta correlação também ocorre. Na ANOVA realizada considerando os deslocamentos verticais, para todas as variantes determinadas de MR, há correlação entre o pulso de carga e a sua magnitude. As interações tempo/pulso de carga não foram relevantes.

Gonçalves e Rodrigues (2004) chamam a atenção para as vantagens na medição dos deslocamentos verticais. Dizem estes autores que como o deslocamento vertical é bem maior do que o horizontal quando das solicitações por compressão indireta, a consideração dos mesmos minimiza os erros experimentais, sendo, portanto, mais interessantes para

determinação das propriedades de deformabilidade das misturas asfálticas. Confirma-se esta observação, na análise das correções pelo efeito de abaulamento que foram realizadas neste estudo.

A Tabela 4.10 apresenta os percentuais de correção médio devido ao efeito de abaulamento determinados. Observa-se que os percentuais foram bastante menores na correção dos deslocamentos verticais, evidenciando menores erros experimentais nesta medida.

Tabela 4.10 – Percentuais médios utilizados para correção dos deslocamentos devido ao efeito de abaulamento

| | | Deslocamento Inst. calculado pelo p/P07 | Deslocamento Inst. Calculado p/ 1-28 | Deslocamento Tot. calculado p/1-28 |
|--------------------------------|-------|--|---|---------------------------------------|
| % correção horizontal aplicado | CA-AB | -25% | -49% | -30% |
| | CA-C | -19% | -48% | -29% |
| % correção vertical aplicado | CA-AB | +9% | +18% | +8% |
| | CA-C | +9% | +18% | +9% |

Percebe-se ainda, da análise da Tabela 4.10, que as correções foram maiores para os deslocamentos instantâneos. Como a correção de abaulamento foi calculada como função da carga de ensaio e da rigidez da mistura, há apenas uma correção de deslocamento horizontal e uma de deslocamento vertical por cada ensaio realizado. A contribuição da magnitude de correção fica, portanto, por conta do algoritmo de cálculo utilizado, que como mostra a Figura 2.22, dependendo da sistemática aplicada para uma mesma curva de deslocamento, há várias formas de se determinar os deslocamentos. Como a rotina de cálculo que determina o deslocamento instantâneo segundo a pesquisa 1-28/1-28A do NHCRP apresenta os menores resultados de deslocamento, fica claro que apresenta também os maiores percentuais de correção, ficando desta forma mais exposta a erros.

Tem-se desta forma, um forte indicativo de que os resultados analisados em função do deslocamento verticais possam estar melhor representando o comportamento em estudo do MR.

Em relação aos testes realizados com os corpos-de-prova de concreto asfáltico convencional (CA-C) para a verificação do efeito da variação do pulso de carga no MR, há algumas discordâncias com o comportamento apresentado pela outra mistura. Na determinação do MR em função do algoritmo apresentado pelo Protocolo P07 e pelo projeto de Pesquisa NCHRP 1-28/1-28A houve um maior número de evidências de MR mais elevados nos ensaios com pulso de carga 0,10s, diferentemente do observado com CA-AB.

As análises de variância indicam forte relação entre a temperatura e pulso de carga com o MR, apresentando também influência da interação temperatura/pulso de carga, salvo para o MR_{i-28} . O MR calculado em função dos deslocamentos verticais apresentou maior coesão de resultados, tendo sido evidenciado melhora mais significativa desta coesão sobre os resultados de MR_{i-28} , cuja distribuição nas análises em função do deslocamento horizontal apresentou resultados consideravelmente mais dispersos.

É importante perceber que a porção reta do caminho de descarregamento tem declividades diferentes nos pulsos de deslocamento quando da variação do tempo de pulso de carga, como mostra a Figura 4.19. Isto certamente influencia na determinação dos deslocamentos instantâneos, pois são estas porções as que controlam o comportamento do módulo instantâneo. Como o intervalo de tempo que se utiliza para determinar o segundo ponto da reta de regressão linear que une estes pontos é o mesmo, mas as inclinações diferentes, acaba-se por ter deslocamentos menores nas maiores inclinações, ainda que os pulsos de deslocamento sejam de maior magnitude.

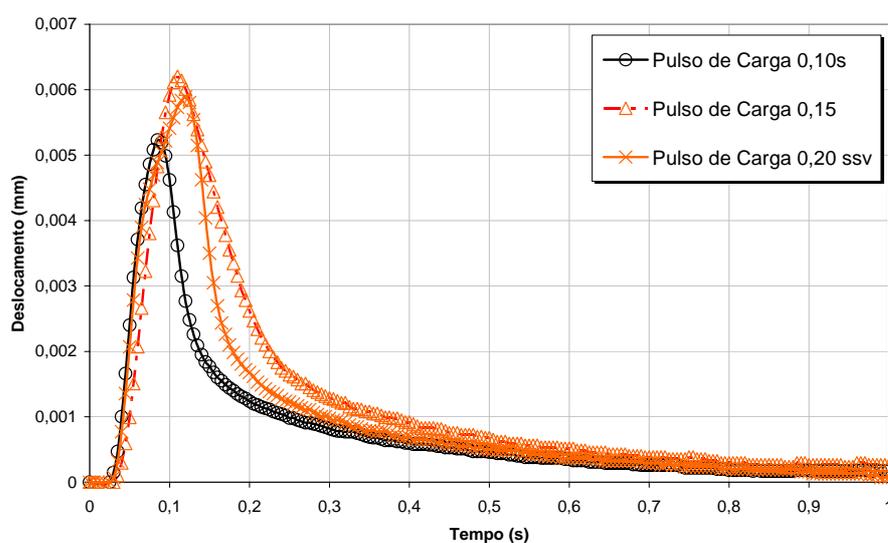


Figura 4.19 – Pulsos de deslocamento dos três tempos de pulsos de carga estudados

4.3.1 Variação do MR em função da frequência de carregamento

Como não foi possível realizar a determinação dos deslocamentos resilientes instantâneos nas frequências de ensaio de 3Hz e 5Hz, devido à restrições impostas pelos algoritmos analisados na pesquisa, realizou-se esta determinação através da diferença entre o ponto correspondente ao pico de deslocamento pela média dos últimos 5 pontos no ciclo, aproximando a sistemática de determinação aquela utilizada no cálculo do MRT_{1-28} . Desta forma, para efeito de comparação com os dados obtidos na frequência de 1Hz, optou-se pela comparação do MRT_{1-28} obtidos nestes ensaios.

A Figura 4.20 mostra os resultados obtidos dos ensaios, tanto para a mistura de CA-AB, Figura 4.20 a, quanto para a mistura de CA-C, Figura 4.20 b.

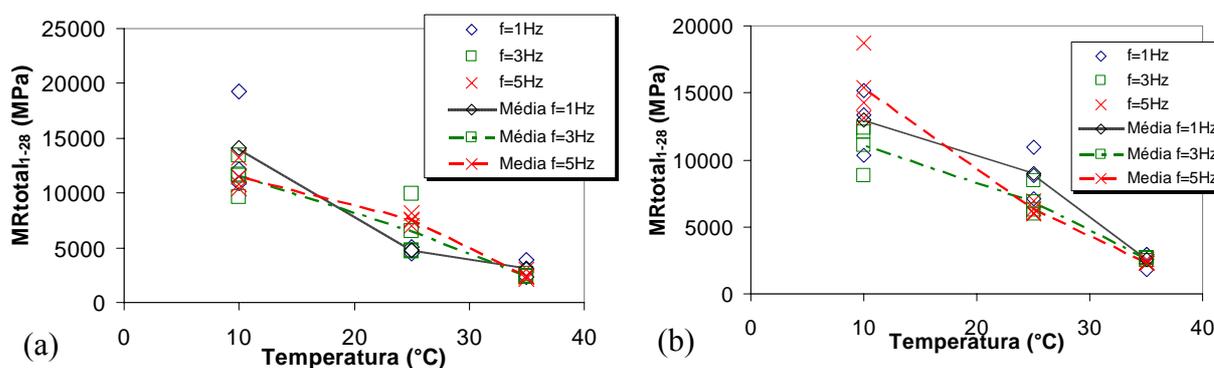


Figura 4.20– MRT_{1-28} em função da frequência de ensaio na mistura de CA-AB (a) e CA-C (b)

A Tabela 4.11 mostra a análise de variância resultante das observações apresentadas na figura anterior. Observa-se que, apesar de haver variação no valor médio de MR em função da frequência de ensaio, variações da ordem de 30%, a 25°C, a variabilidade entre as amostras leva a um teste estatístico negativo para a interação MR e frequência de ensaio. Note-se ainda que a interação temperatura-frequência *versus* MR também não foi relevante.

Tabela 4.11 – ANOVA realizada para os resultados de MR em função da frequência de ensaio na mistura de CA-AB

| Fonte da variação | gl | CA-AB MRT_{1-28} | | CA-C MRT_{1-28} | |
|-------------------|----|--------------------|-----------|-------------------|-----------|
| | | F | F crítico | F | F crítico |
| Temperatura | 2 | 53,28 | 3,55 | 92,00 | 3,55 |
| Frequência | 2 | 0,13 | 3,55 | 1,63 | 3,55 |
| Interações | 4 | 1,53 | 2,93 | 2,76 | 2,93 |

4.3.3 Variação do MR em função da carga aplicada durante o ensaio

Percebe-se da análise dos resultados anteriormente apresentados que o modelo matemático preconizado pelo Protocolo P07 para determinação dos MRi resulta em valores próximos aos MR_{t-28} , determinados segundo o algoritmo da pesquisa 1-28/1-28A, o que já poderia ser previsto em função da semelhança resultante do método de cálculo utilizado em ambas as funções. Optou-se, portanto, para as análises apresentadas a seguir, interpretá-las apenas em função do MR_{t-28} e do MR_{i-28} .

A Figura 4.21 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de MR na mistura de CA-AB quando da variação da carga de ensaio, determinada a partir da resistência à tração da mistura. Dos níveis considerados para avaliação, descritos no item 3.3.1c, houve ajustes feitos devido à correção da carga aplicada. Como esta calibração não foi inserida no programa de controle dos ensaios, os níveis aplicados tiveram de ser corrigidos para a análise. Adicionalmente, como os níveis altos de RT não puderam ser aplicados na temperatura de 10°, devido aos elevados níveis de carga requeridos, estes tiveram de ser reduzidos, abaixo dos níveis avaliados nas outras duas temperaturas. Entretanto, para que se pudesse realizar a análise de variância, houve necessidade de omitir tais resultados, de outra forma, os níveis seriam diferentes e os resultados da ANOVA incoerentes. Os níveis de tensão planejados foram de 15%, 30% e 40%RT, enquanto que os níveis reais aplicados foram de 11%, 25% e 35% da RT, tanto para a mistura de CA-AB quanto para as misturas de CA-C.

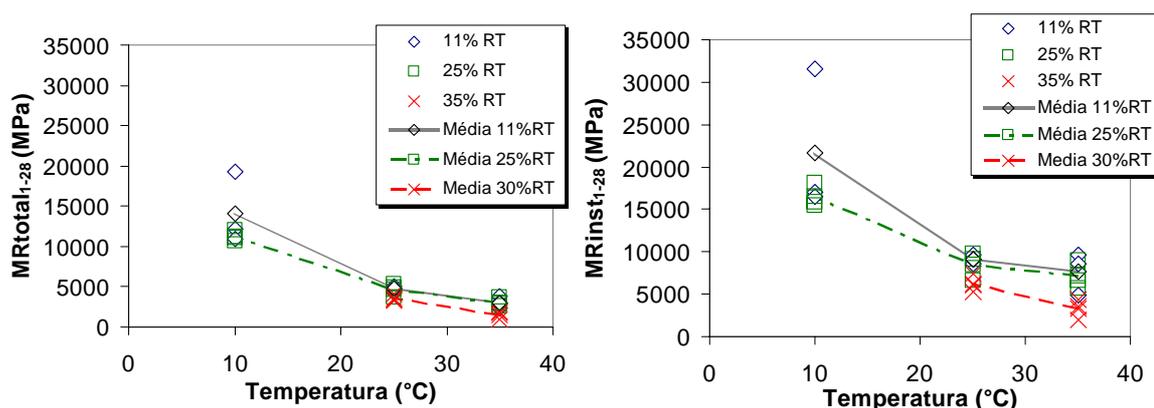


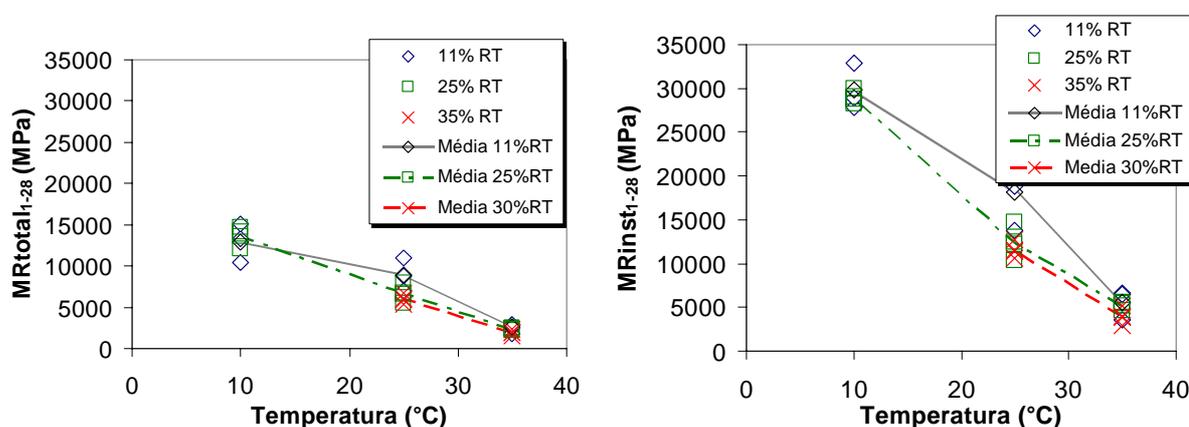
Figura 4.21 – MR_{t-28} MR_{i-28} em função do tempo do percentual de RT utilizado no ensaio (CA-AB)

A Tabela 4.12 mostra os resultados da análise de variância realizada para avaliar o efeito do percentual de RT aplicada durante o ensaio de MR para a mistura de CA-AB.

Tabela 4.12 – ANOVA realizada para os resultados de $MR_{t_{1-28}}$ $MR_{i_{1-28}}$ em função do percentual de RT utilizado no ensaio (CA-AB)

| <i>Fonte da variação</i> | <i>gl</i> | <i>CA-AB $MR_{t_{1-28}}$</i> | | <i>CA-AB $MR_{i_{1-28}}$</i> | |
|--------------------------|-----------|---|------------------|---|------------------|
| | | <i>F</i> | <i>F crítico</i> | <i>F</i> | <i>F crítico</i> |
| Temperatura | 1 | 39,63 | 4,75 | 6,83 | 4,75 |
| %RT | 2 | 9,62 | 3,89 | 9,32 | 3,89 |
| Interações | 2 | 0,23 | 3,89 | 0,53 | 3,89 |

A Figura 4.22 apresenta os resultados obtidos para a mistura de CA-C da análise dos resultados obtidos de MR em função da variação de carga usada do ensaio. A Tabela 4.13 apresenta a ANOVA para a mesma análise.

Figura 4.22 – $MR_{t_{1-28}}$ $MR_{i_{1-28}}$ em função do tempo do percentual de RT utilizado no ensaio (CA-C)Tabela 4.13 – ANOVA realizada para os resultados de $MR_{t_{1-28}}$ $MR_{i_{1-28}}$ em função do percentual de RT utilizado no ensaio (CA-C)

| <i>Fonte da variação</i> | <i>gl</i> | <i>CA-C $MR_{t_{1-28}}$</i> | | <i>CA-C $MR_{i_{1-28}}$</i> | |
|--------------------------|-----------|--|------------------|--|------------------|
| | | <i>F</i> | <i>F crítico</i> | <i>F</i> | <i>F crítico</i> |
| Temperatura | 1 | 104,39 | 4,75 | 81,90 | 4,75 |
| %RT | 2 | 4,87 | 3,89 | 6,07 | 3,89 |
| Interações | 2 | 2,39 | 3,89 | 2,99 | 3,89 |

Da análise dos resultados apresentados, verifica-se que tanto para a mistura de CA-AB quanto para a mistura de CA-C houve influência tanto da temperatura quanto do %RT nos resultados obtidos. No tocante ao comportamento frente ao percentual de carga aplicada, evidencia-se que valores mais altos de carga utilizados no ensaio retornam valores menores de MR, 10 a

20% em média. Este comportamento foi observado com um pouco mais de intensidade na mistura com ligante asfalto-borracha, tanto para os valores de $MR_{i_{1-28}}$ quanto para os valores de MRT_{1-28} .

Em relação à mistura de CA-C a maior relação ficou com o MRT_{1-28} . Uma alternativa para entendimento deste comportamento é a sistemática de interpretação utilizada pelos algoritmos. Como os deslocamentos instantâneos estão associados à parcela do deslocamento puramente elástico, fica este valor mais exposto a variações, principalmente em relação à sistemática de ensaio utilizada. O valor de MRT_{1-28} , por representar o deslocamento total obtido, independe de algoritmos complexos de determinação, ficando menos suscetível a tais variações. É, entretanto, importante de se recordar, que a análise da parcela tempo-dependente com um todo (deslocamento resiliente total) não fica restrita ao limites de elasticidade, ou seja, apesar de resultar em ensaios aparentemente mais coesos, pode estar impondo na análise efeitos não elásticos. Deve-se, assim, questionar se a variabilidade na determinação do $MR_{i_{1-28}}$ é mais ou menos representativa do que a variabilidade que o valor de MRT_{1-28} . Questiona-se, ainda, sobre a determinação do $MR_{i_{p07}}$, que por aproxima-se do valor de MRT_{1-28} pode estar retornando na análise resultados tempo-dependentes e não elástico-lineares, como se espera.

Para ensaios na qual a resposta tempo-dependente seja mais evidente, entretanto, a resposta do $MR_{i_{p07}}$, parece ser melhor, resultando numa boa análise para separação da parcela elástica. Isto talvez possa ser mais bem estudado, a partir de uma análise dos tempos utilizados na determinação das retas de apoio.

4.3.4 Variação do MR em função da forma do pulso de carga

Um dos itens verificados nesta análise paramétrica é a verificação da influência da forma do pulso de carga no valor de MR. As duas formas analisadas, conforme citado no item 3.1.1d, foram: semi-seno-verso e pulso “quadrada”, mostrados na Figura 3.1, com tempos de pulso de carga de 0,2s.

A Figura 4.23 mostra os resultados obtidos desta análise da forma do pulso de carga para a mistura CA-AB. Na Tabela 4.14 está apresentada a ANOVA feita para verificação interação entre forma de pulso de MR.

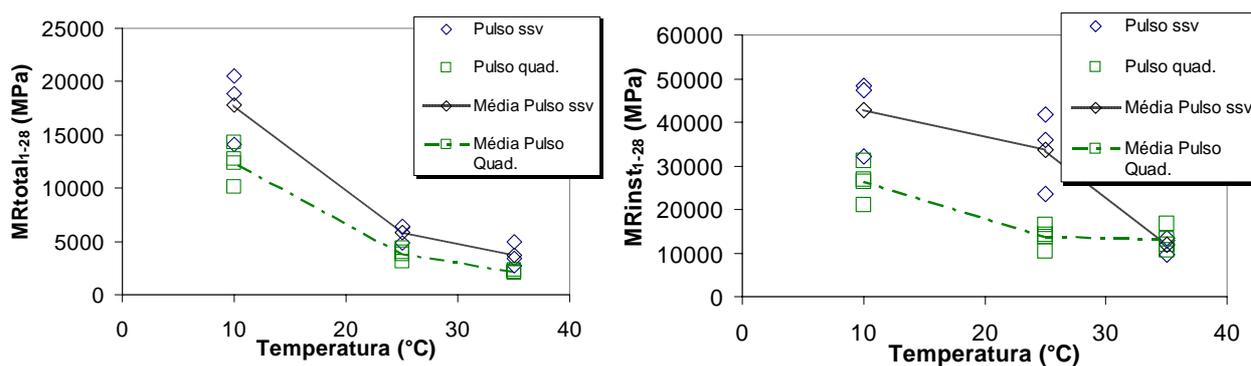


Figura 4.23 – $MR_{t_{1-28}}$ $MR_{i_{1-28}}$ em função do tempo da forma do pulso de carga usada no ensaio (CA-AB)

Tabela 4.14 – ANOVA realizada para os resultados de $MR_{t_{1-28}}$ $MR_{i_{1-28}}$ em função da forma do pulso de carga usada no ensaio (CA-AB)

| Fonte da variação | gl | CA-AB $MR_{t_{1-28}}$ | | CA-AB $MR_{i_{1-28}}$ | |
|-------------------|----|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| | | F | F crítico | F | F crítico |
| Temperatura | 2 | 85,65 | 3,89 | 19,92 | 3,89 |
| Forma Pulso | 1 | 13,74 | 4,75 | 16,95 | 4,75 |
| Interações | 2 | 2,21 | 3,89 | 5,24 | 3,89 |

A Figura 4.24 mostra os resultados de MR para dois tipos de forma de pulso de carga, ssv e quadrada para a mistura de concreto asfáltico convencional – CA-C. A Tabela 4.15 mostra a análise de variância realizada para estes resultados.

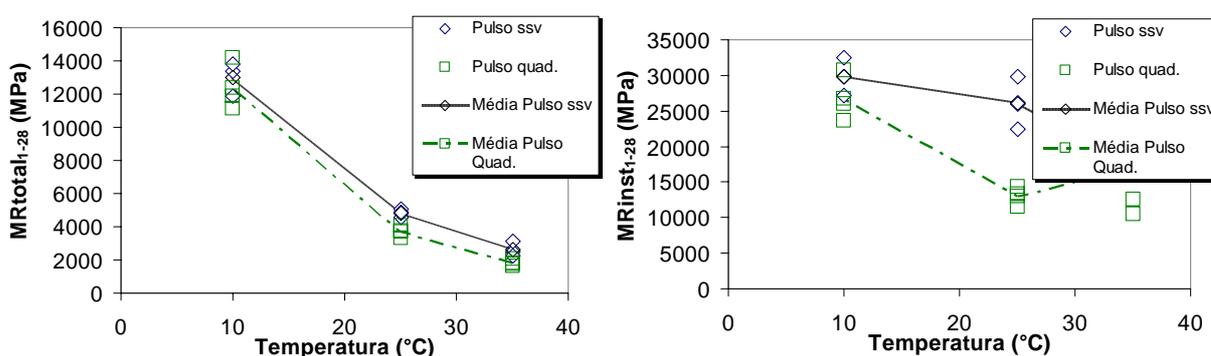


Figura 4.24 – $MR_{t_{1-28}}$ $MR_{i_{1-28}}$ em função do tempo da forma do pulso de carga usada no ensaio (CA-C)

Tabela 4.15 – ANOVA realizada para os resultados de MRT_{1-28} e MRI_{1-28} em função da forma do pulso de carga usada no ensaio (CA-C)

| <i>Fonte da variação</i> | <i>gl</i> | <i>CA-C MRT₁₋₂₈</i> | | <i>CA-C MRI₁₋₂₈</i> | |
|--------------------------|-----------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|
| | | <i>F</i> | <i>F crítico</i> | <i>F</i> | <i>F crítico</i> |
| Temperatura | 2 | 271,90 | 3,89 | 9,18 | 3,89 |
| Forma Pulso | 1 | 4,94 | 4,75 | 6,17 | 4,75 |
| Interações | 2 | 0,15 | 3,89 | 3,05 | 3,89 |

O módulo de resiliência parece ser sensível às formas do pulso de carga impostas nas análises executadas. Nas Figura 4.23 e Figura 4.24, o MRI_{1-28} e MRT_{1-28} de ambas as misturas apresentou valores mais baixos para o pulso do tipo quadrado. As maiores diferenças encontram-se nos ensaios realizados a 25°C em relação ao MRI do CA-C; em contrapartida, a maior influência foi apresentada na mistura CA-AB cujo teste F apresentou resultados com maior nível de significância que os de CA-C, apesar deste também ter apresentado nível de significância em relação à forma do pulso de carga.

O efeito da temperatura, assim como nas outras análises discutidas, também foi evidenciado. É bastante significativo, entretanto, a queda do valor do teste F nas análises feitas em função de MRI_{1-28} . Isto é devido à maior dispersão de resultados apresentados, o que acaba por gerar uma falsa impressão de menor nível de significância da temperatura no MRI .

Ressalva-se ainda que os volumes de vazios das amostras estudadas foram baixos. Podendo, portanto terem afetado de alguma forma as análises realizadas.

4.4 VIDA DE FADIGA

As características de resistência à fadiga são importantes indicadores de desempenho do pavimento. Sua interpretação está diretamente relacionada às manifestações de trincamento por fadiga que ocorrem no pavimento. Suas características são comumente expressas em relação à tensão ou deformação inicial atuante bem como ao número de repetições de carga até a ruptura. Em laboratório este ensaio é realizado no mesmo tipo de equipamento utilizado para determinação do MR, porém sem o uso de transdutores de deslocamento. O parâmetro de análise é o número de ciclos que leva o corpo-de-prova à ruptura.

Com o objetivo de avaliar a evolução do MR durante a vida de fadiga, adaptou-se o mesmo sistema de leitura de deslocamentos colados à face do corpo-de-prova utilizado nos ensaios de MR para determinação da vida de fadiga; utilizou-se, entretanto apenas o sensor de deslocamento horizontal. Com isto foi possível o registro dos valores de deslocamento e cálculo do MR, uma vez que o equipamento de testes de fadiga do LAPAV já possuía célula de carga adaptada.

Porém, diferentemente do que se havia proposto inicialmente, devido a dificuldades técnicas no laboratório impossibilitou-se a realização da curva de fadiga da mistura de concreto asfáltico convencional, ficando o ensaio restrito às análises realizadas com a mistura de CA-AB.

Os modelos de fadiga, gerados a partir das curvas de Wöhler, da mistura de CA-AB estão ilustrados na Figura 4.25 para efeito de caracterização das mesmas.

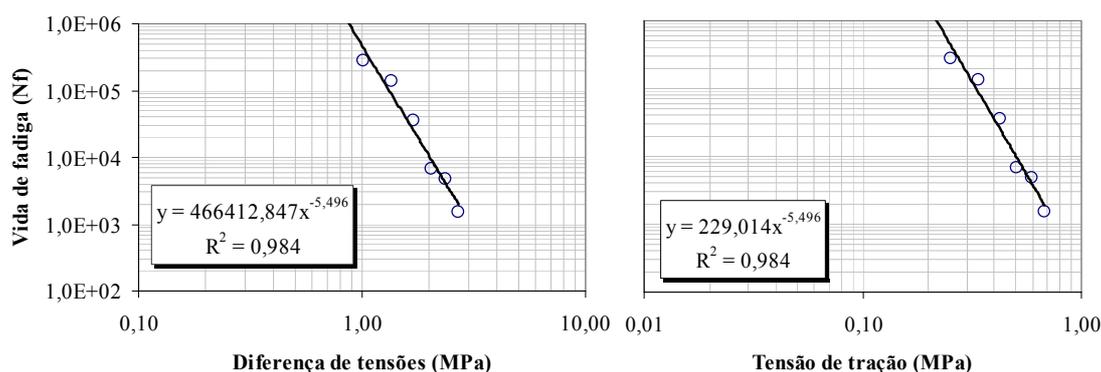


Figura 4.25 – Modelos de Fadiga em função da diferença de tensões e da tensão de trabalho.

Para análise da variação do MR em função do número de ciclos, montou-se o gráfico apresentado na Figura 4.26. Todos os níveis de tensão de tração a que foram submetidos a amostra para determinação da vida de fadiga apresentaram o mesmo comportamento.

Evidentemente, as inclinações das curvas apresentam diferenças entre as várias tensões aplicadas para determinação da curva de fadiga. As curvas correspondentes a altos níveis percentuais da tensão de ruptura aplicada, não apresentam as três zonas bem definidas. As zonas de estabilidade praticamente não se evidenciam, passando quase que diretamente da zona de condicionamento à zona de falha. Nos baixos níveis de tensão, o patamar de estabilidade tende a se manter por um maior número de aplicações de carga.

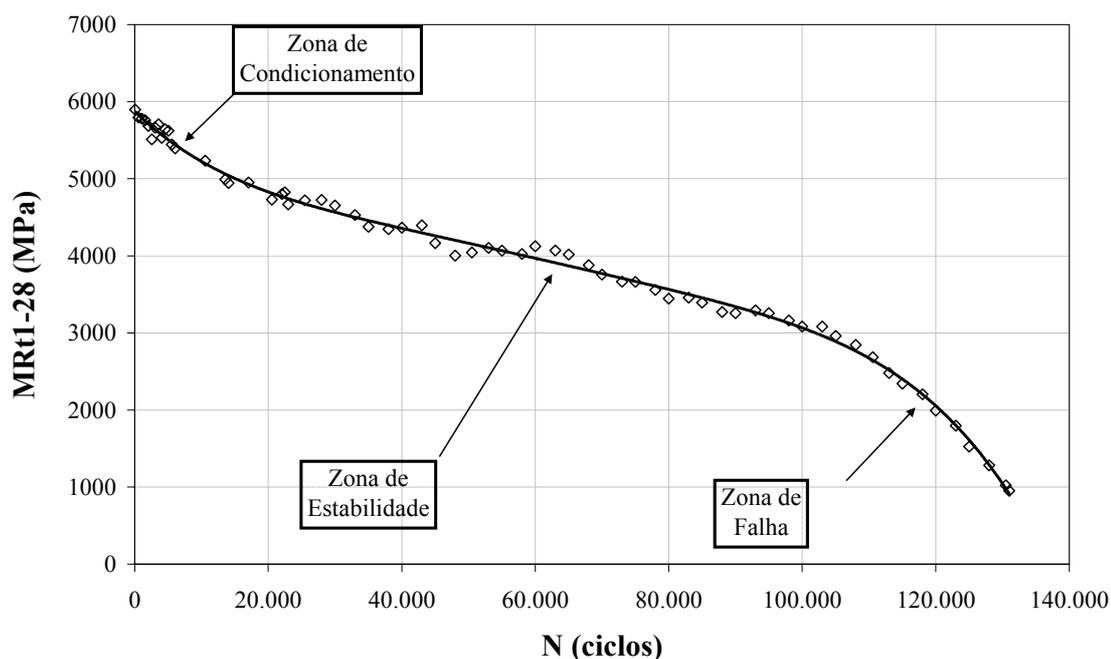


Figura 4.26 – Evolução do MRt1-28 em função do número de ciclos (20%RT aplicado)

Em relação à variação do valor de MR, fica bastante claro que na zona de condicionamento, tem-se uma considerável inclinação negativa da curva, principalmente para níveis de tensão de ruptura maiores que 20% da RT, demonstrando uma rápida dissipação da energia resistente do material e conseqüentemente alterando suas propriedades. Esta magnitude fica próximo aos 10% de redução no valor do MR para 5000 ciclos aplicados, considerando uma tensão aplicada equivalente a 20% da RT.

Para retratar esta evolução de deformações no corpo-de-prova ao longo da vida deste, optou-se por, conforme Choi *et al.* (2005), representar as curvas em função da evolução do MR e da proporção da vida usada. A Figura 4.27 mostra então a evolução da perda de rigidez das misturas ao longo da vida de fadiga. Os níveis de 35, 30 e 15% da RT não foram apresentados por falta de dados devido a problemas operacionais durante os ensaios.

Os valores apresentados foram resultantes da análise de amostras de concreto asfáltico com adição de borracha, testados a fadiga controlada sob temperatura de 25°C. A análise matemática utilizada para determinação dos deslocamentos resilientes foi a da pesquisa 1-28/1-28A do NCHRP para cálculo dos deslocamentos resilientes instantâneos.

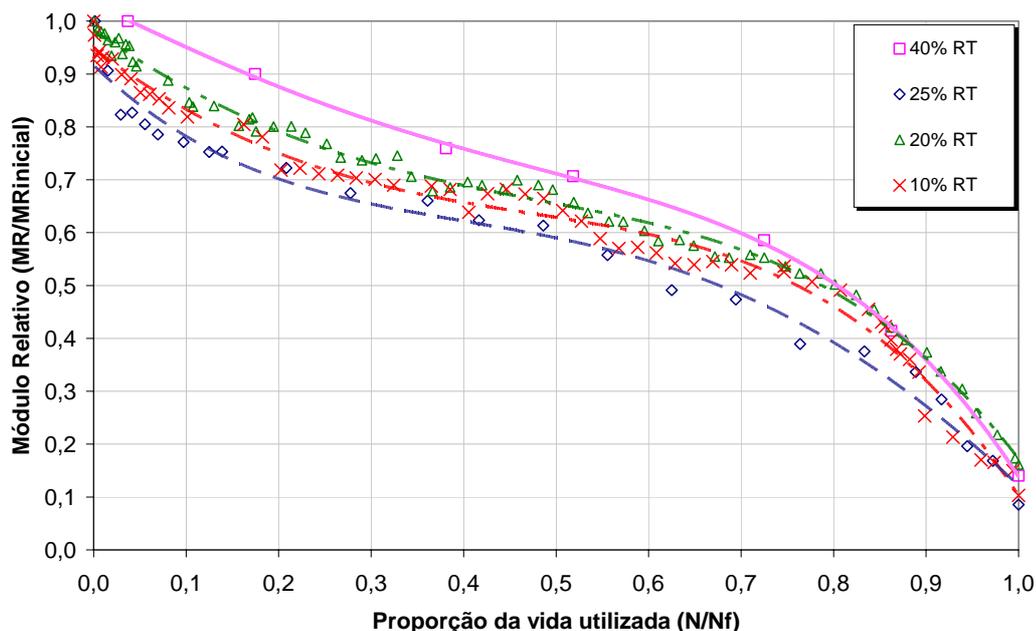


Figura 4.27 – Redução da rigidez ao longo da vida de fadiga

4.5 DEFASAGEM ENTRE PULSO DE CARGA E DESLOCAMENTO

Na intenção de melhor compreender as componentes tempo-dependente dos materiais asfálticos, objetivou-se complementarmente nesta pesquisa à determinação do ângulo de defasagem entre o pulso de deslocamento e o pulso de carregamento. Este parâmetro é usualmente determinado no ensaio de módulo complexo. Entretanto, como o sistema adaptado possui alta velocidade de resposta e o sistema de suporte de LVDTs preso na face do corpo-de-prova reduz a defasagem parasita, foi possível determinar um parâmetro análogo nos ensaios de MR.

Para a determinação do ângulo de defasagem entre o pulso de deslocamento e o pulso de carga, procedeu-se a diferença de tempo existente entre o valor do ponto de máximo deslocamento pelo tempo onde ocorre o ponto de máxima carga, conforme ilustrado na Figura 4.28. Fez-se então a média de cinco leituras por corpo-de-prova ensaiado. Para apresentação dos gráficos, utilizaram-se as médias dos resultados dos ensaios realizados com corpos-de-prova em triplicata, e a análise matemática utilizada foi àquela recomendada pela pesquisa 1-28/1-28A.

A Figura 4.29 mostra os resultados de defasagem obtidos para os ensaios de MR com a mistura CA-AB (a) e também com a mistura CA-C (b). Observa-se da análise dos dados

apresentados, que há uma coerência na distribuição das defasagens apresentadas com a temperatura. A magnitude parece estar com pequenos decréscimos em relação aos limites encontrados na literatura para ângulos de fase. Afora a relação apresentada pelo ensaio de MR@25°;1Hz;0,20ssv;15%, todos os outros dados também apresentaram homogeneidade dentro do grupo, demonstrando assim, que há também uma variação do ângulo de defasagem em função das condições de ensaio.

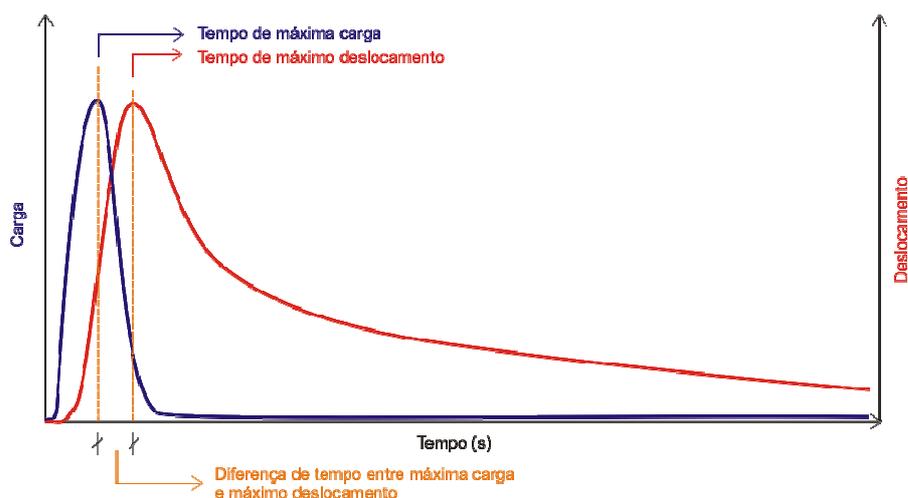


Figura 4.28 – Representação da defasagem medida entre pulso de carga e deslocamento

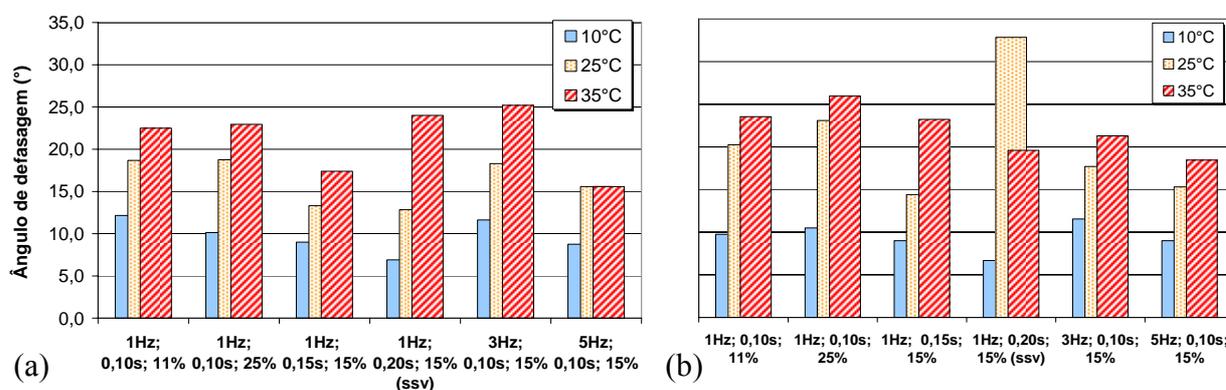


Figura 4.29 – Ângulos de defasagem apresentados nos ensaios de MR
(a) CA-AB e (b) CA-C

Pais e Pereira (2002) mostram algumas formas de representação que permitem a avaliação do ângulo de fase, determinado no ensaio de módulo complexo. A representação entre o logaritmo do módulo complexo e o ângulo de fase, deve apresentar uma evolução linear decrescente, compondo o chamado de “diagrama de Black”. Quanto maior for o valor da rigidez de uma mistura, módulo complexo, ou ainda MR, tão menor será a parcela tempo-dependente e será, portanto, menor o ângulo de fase.

Para análise dos resultados encontrados, procede-se à montagem do digrama Black (*Black diagram*) para ambas as misturas. A Figura 4.30 mostra os dados obtidos para a mistura CA-AB, enquanto a Figura 4.31 apresenta os dados para a mistura CA-C. Os dados referentes aos ângulos de defasagem determinados nos pulsos com 0,20s tipo “quadrado”, foram considerados expúrios nas análises, e foram, portanto, excluídos das análises apresentadas.

Verifica-se uma boa correlação dos modelos apresentados, indicando a coerência dos dados obtidos, do que se conclui que a determinação da defasagem entre o pulso de carga e o deslocamento é um também um indicativo do comportamento das misturas. Percebe-se, ainda, que a mistura com asfalto borracha apresentou maior inclinação da reta de regressão e valores de defasagem menor, em comparação aos resultados obtidos com a mistura convencional.

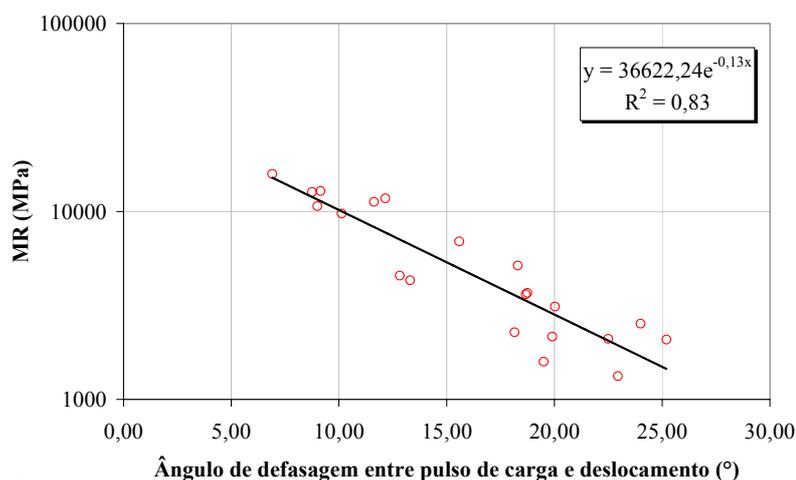


Figura 4.30 – Ângulo de defasagem determinado no ensaio de MR para a mistura CA-AB

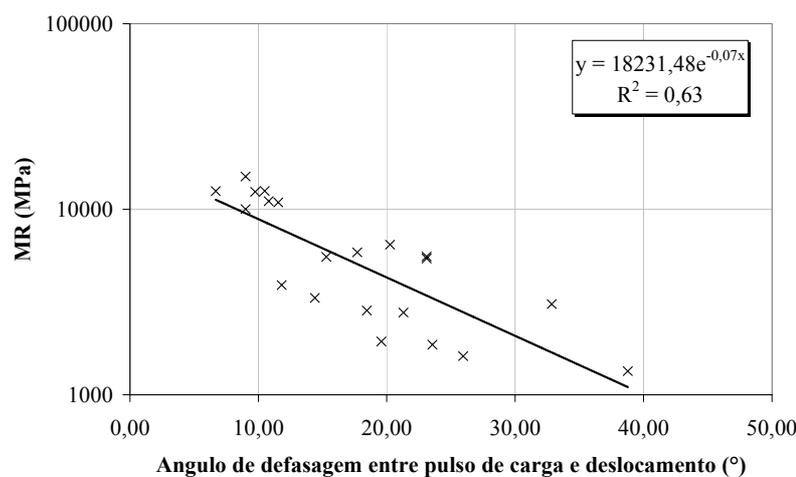


Figura 4.31 – Ângulo de defasagem determinado no ensaio de MR para a mistura CA-C

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa realizou-se uma avaliação do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas utilizado na determinação do módulo de resiliência (MR) de materiais asfálticos para pavimentação. Nesta análise, apresenta-se tanto uma discussão acerca da metodologia de ensaio empregada quanto uma análise paramétrica do mesmo, com o objetivo de identificar algumas das variáveis responsáveis pela variabilidade do módulo de resiliência de misturas asfálticas. A revisão bibliográfica apontou para itens que nortearam esta avaliação, identificando alguns itens relevantes e mostrando também a importância da acurada determinação deste parâmetro.

Em relação aos procedimentos de ensaio, aqueles aplicados para a definição dos deslocamentos resilientes foram o Protocolo P07 do LTPP e a pesquisa do NCHRP 1-28/1-28A.

A seguir são descritas as conclusões que puderam ser estabelecidas após as investigações apresentadas nos capítulos 2 e 3:

- i. A análise realizada indica que apesar da variabilidade existente nas misturas asfálticas, grande parte da variabilidade do MR é devido ao procedimento de ensaio, devendo este ser o mais detalhado possível evitando margens a interpretações.
- ii. De acordo com a pesquisa bibliográfica, influenciam na determinação do MR: as simplificações teórico-matemáticas impostas ao ensaio, o número de ciclos de condicionamento aplicado, a forma e período do pulso de carga, o período de descanso a que o corpo-de-prova é submetido, o nível de tensão aplicado para sua determinação, o equipamento utilizado (sensores de deslocamento, sistema de carregamento, largura dos frisos de transmissão de carga), coeficiente de Poisson, método de determinação dos deslocamentos resilientes, deformabilidade não linear durante o ensaio, calibração do equipamento, nível de ruído no sistema de leitura e temperatura do corpo-de-prova.

- iii. A bibliografia consultada indica que o pulso de carga a ser adotado é do tipo semi-seno-verso (*haversine*) com duração de 0,1s.
- iv. O efeito de abaulamento deve ser considerado e corrigido, tanto para as medidas de deslocamento realizadas por LVDTs colados na face dos corpos-de-prova quanto por LVDTs presos pelo sistema de alças, externo à amostra.
- v. Os algoritmos de determinação dos deslocamentos resilientes apresentam diferenças consideráveis na determinação do MR, devendo ser avaliado de antemão o mais adequado a ser utilizado. Conclui-se pelos resultados obtidos que o algoritmo apresentado pela pesquisa 1-28/ 1-28A do NCHRP seja o mais adequado. O Protocolo P07, na análise de MR instantâneo, determina o deslocamento pela diferença entre o ponto de máximo deslocamento e o ponto de interseção das regressões lineares sugeridas. Isto resulta em um ponto externo à curva de deslocamento, o que conduz a uma determinação mais suscetível a erros do que a análise sugerida pela pesquisa 1-28/1-28A. Adicionalmente, o MRt determinado por esta última metodologia supre a sistemática usualmente utilizada nos centros de pesquisas nacionais para determinação do MR, que utilizam um algoritmo misto, baseado nos seguintes procedimentos de ensaio: AASHTO TP-31-96, ASTM D-4123 e LTPP P07.
- vi. Ainda em relação aos algoritmos para determinação dos deslocamentos resilientes, é importante o conhecimento do tipo de curva de deslocamento resultante do ensaio para entendimento do resultado obtido. Variações nos limites de tempo das retas de apoio acarretam em diferenças significativas na medição dos deslocamentos, podendo, se utilizados de forma incorreta, invalidar os resultados.
- vii. O equipamento utilizado deve ser calibrado, considerando-se o deslocamento que haverá na mistura testada, pois este deslocamento comandará o volume de ar demandado para o pulso, o que pode acarretar em variações no pulso de carga. Salienta-se a importância da solicitação mínima de volume de ar ao sistema pneumático, para que se evite variações no pulso de carregamento.
- viii. A relação sinal-ruído, principalmente nos canais de aquisição de dados relativos aos sensores de deslocamento, mostrou-se uma fonte importante de variabilidade, com

maior evidência nas análises provenientes do algoritmo de cálculo proposto pelo Protocolo P07.

- ix. A adaptação do equipamento aos procedimentos internacionais se mostrou bastante eficiente na contribuição para uma melhor qualidade nos ensaios. O monitoramento em tempo real dos pulsos de carga e deslocamento facilita o acompanhamento do ensaio apontando problemas e auxiliando na sua resolução. Adicionalmente, o referenciamento dos algoritmos para cálculo dos deslocamentos resilientes necessita deste monitoramento para que os períodos de análise possam ser corretamente interpretados.

A partir da realização do programa experimental proposto na pesquisa, envolvendo ensaios de MR, RT e vida de fadiga sob tensão controlada, foi possível estabelecer as conclusões a seguir:

- i. É possível realizar estudos mais completos da resistência à tração de materiais asfálticos com o auxílio de instrumentação. O monitoramento de carga aplicada e do deslocamento de extensão durante o ensaio, possibilita uma análise tensão-deformação do corpo-de-prova ensaiado, agregando resultados sobre o comportamento a fadiga das misturas a partir de considerações de energia de fratura. Faz-se importante para tanto, pesquisas mais aprofundadas acerca de sua interpretação, ainda bastante incipiente em metodologia.
- ii. A determinação do coeficiente de Poisson durante o ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas, assim como na literatura pesquisada, apresenta considerável variabilidade. Entretanto, tal variabilidade é reduzida fazendo-se as correções do efeito de abaulamento gerado durante o ensaio. Para a determinação do coeficiente de Poisson, o algoritmo de cálculo de determinação dos deslocamentos resilientes que se apresentou mais eficiente foi aquele proposto pelo Protocolo P07.
- iii. Em relação à análise paramétrica realizada no ensaio, observa-se a dependência do MR ao pulso de carga, à frequência de ensaio e também ao nível de tensão aplicado durante o ensaio. A proporção de ocorrência, entretanto, é função do tipo de mistura e da temperatura sob a qual o ensaio foi realizado.
- iv. Para o efeito do pulso de carga observou-se que em média os valores de módulo de resiliência foram maiores com os maiores tempos de carregamento. É possível que isto seja devido à velocidade de carregamento, que é maior nos tempos maiores de pulso

de carga, ou ainda devido à forma das curvas de deslocamento, que apresentam efeito visco-elástico mais acentuado, resultando em menores porções elásticas.

- v. A variação do módulo de resiliência em função da frequência de ensaio resultou, em regra, em maiores valores para as maiores frequências de ensaio, reflexo dos menores períodos de descanso.
- vi. O módulo apresentou maiores valores quando foram utilizados menores níveis de tensão. Isto pode ser explicado pela menor mobilização dos efeitos visco-elásticos que, quando solicitados, acabam por mobilizar maiores deslocamentos totais levando a menores valores de módulo de resiliência quando da aplicação de percentuais de RT maiores.
- vii. A aplicação de pulso de carga na forma de semi-seno-verso resultou em valores de MR maiores do que aqueles obtidos quando da aplicação de carga sob a forma de pulso “quadrada”, possivelmente devido à maior energia fornecida ao corpo-de-prova quando da aplicação desta última forma de pulso, resultando assim em maiores deslocamentos e conseqüentemente a menores valores de MR.
- viii. Os deslocamentos verticais apresentaram menores percentuais de correção pelo efeito de abaulamento, levando a menores dispersões na determinação do MR
- ix. Durante os ensaios de vida de fadiga sob tensão controlada pode-se evidenciar a redução dos valores de MR dentro da zona de condicionamento. A instrumentação durante este ensaio proporcionou uma investigação mais apropriada sobre a deformabilidade das misturas asfálticas, possibilitando análises complementares àquelas realizadas para determinação dos modelos de fadiga tradicionalmente considerados.
- x. A defasagem medida entre o pulso de carga e o pulso de deslocamento apresentou-se como sendo um possível parâmetro de análise sobre o comportamento visco-elástico das misturas, apresentando boa correlação de valores e comportamento semelhante ao ângulo de fase medido nos ensaios de módulo complexo.
- xi. Um maior número de níveis poderia evidenciar melhor a variação do MR em função de cada efeito. Entretanto, para que fosse possível fazer esta verificação, um maior

número de ensaios seriam necessários, o que acarretaria em um projeto experimental maior e com um consumo de tempo incompatível com aquele disposto para esta dissertação.

Apesar de haver vários fatores que influem na determinação do MR, como foi mostrado, desde as formulações até as sistemáticas de ensaio, considerável parte da variabilidade verificada neste ensaio é proveniente da análise dos deslocamentos. Como tais medidas são de magnitude bastante reduzida, pequenas variações de deslocamento resultam em grandes oscilações no valor de módulo de resiliência.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de continuidade desta pesquisa sugere-se:

- i. Rever a norma brasileira atual para o ensaio de módulo de resiliência sob cargas repetidas, especificando o algoritmo de cálculo a ser utilizado e especificar minuciosamente os detalhes de ensaio a serem seguidos, tais como forma e período do pulso de carregamento a ser utilizado, nível de carregamento a ser realizado durante o ensaio, número de ciclos de condicionamento e valor do coeficiente de Poisson a ser utilizado nos cálculos.
- ii. Estudo dos limites utilizados nos modelos matemáticos para determinação da variação do módulo de resiliência com modificação destes limites, estendendo o estudo para otimização destes parâmetros quando da análise de ensaios realizados sob diferentes temperaturas.
- iii. Estudo detalhado do efeito de abaulamento, avaliando as correções necessárias em um intervalo maior do que o estudado para os parâmetros de entrada, fazendo também tais correções nas tensões de tração.
- iv. Busca de um sistema de posicionamento de LVDTs menos susceptível aos erros devido ao efeito de abaulamento.

- v. Realização dos ensaios analisados em amostras cuja variabilidade volumétrica seja a menor possível, evitando de se inferir variações na determinação do MR por outros efeitos que não o da metodologia de ensaio ou variabilidade inerente ao material.
- vi. Interpretação das características de fadiga em função da evolução do MR e também da normalização apresentada.
- vii. Determinação de curvas de fadiga sob deformação controlada a partir do equipamento adaptado, comparando com os efeitos observados no ensaio de tensão controlada, auxiliado pela determinação do ângulo de defasagem entre o pulso de deslocamento e o pulso de carga.
- viii. Interpretação dos parâmetros de energia de fratura provenientes do ensaio de RT instrumentado.
- ix. Investigação do ângulo de defasagem observado no ensaio de MR, buscando a interpretação deste parâmetro em função das características viscoelásticas apresentadas pelas misturas asfálticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADEDIMILA, A. S.; KENNEDY, T. W. **Fatigue and resilient characteristics of asphalt mixtures by repeated-load indirect tensile test.** Research Report 183-5, Center for Highway Research, The University of Texas at Austin, August 1975.
- AL-SUGAIR, F.H.; ALMUDAIHEEM, J.A. Variation in measured resilient modulus of asphalt mixes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 4, n. 4, p. 343-352, 1992.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Guide for Design of Pavement Structures.** Washington, D. C., 1996.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Standard test method for determining resilient modulus of bituminous mixtures by indirect tension.** In: AASHTO Provisional Standard TP31-96 Edition 1B. 1996.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for dynamic modulus of asphalt mixtures.** D3497-79. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 3p. 1995.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures.** D4123. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 4p. 1995.
- ANAGNOS, J. N.; KENNEDY, T. W. **Practical method of conducting the indirect tensile test.** Research Report 98-10, Center for Highway Research, The University of Texas at Austin, August 1972.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.** ABNT/NBR 7222. Rio de Janeiro, 1994.
- AZAMBUJA, D; THEISEN, K; BRITO, L. A. T.; CRUZ, L.; CERATTI, J. A.; NÚÑEZ, W. P. Comparação entre respostas estruturais de pavimentos medidas in situ e estimadas pela teoria da elasticidade. In: XXXI JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 2004, Mendoza. **Anais...** 2004.
- BARKSDALE, R. D. Compressive stress pulse times in flexible pavements for use in dynamic testing. **Highway Research Record 345**, Highway Research Board, Washington, D. C., 1971.
- BARKSDALE, R. D., ALBA, J., KHOSLA, N. P., KIM, R. e RAHMAN, M.S. **Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design.** Project 1-28, Final Report, Georgia Tech Project E20-634, USA, 1997.
- BONAQUIST, R.; ANDERSON, D. A.; FERNANDO E. Relationship between moduli measured in the laboratory by different procedures and field deflection measurement. **Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 55, p. 419-452, 1986.

BONNAURE, F. P.; HUIBERS, A. H. J. J.; BOONDERS, A. A laboratory investigation of the influence of rest periods on the fatigue characteristics of bituminous mixes. **Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 51, Kansas City.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Determination of the indirect tensile stiffness modulus of bituminous mixtures**. DD213. London, 1993. 16p.

BROWN, E.R.; FOO, K.Y. **Evaluation of variability in resilient modulus test**. NCAT – National Center for Asphalt Technology. Auburn, report n.91-6. 1989. 44p.

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.

CERATTI, J. A. P. **Estudo do comportamento à fadiga de solos estabilizados com cimento para utilização em pavimentos**. 1991. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência**. DNER – ME 133/94. Rio de Janeiro, 1994. 5p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral**. DNER – ME 138/94. Rio de Janeiro, 1994. 4p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos**. DNER. Rio de Janeiro, 1998b. 242p.

DI BENEDETTO, H.; CORTÉ, J. **Matériaux routiers bitumineux 2**. França: Editora Lavoisier, 2004. 288p.

DOUGAN, C. E.; STEPHENS, J. E.; MAHONEY, J.; HANSEN, G. **E* - dynamic modulus / test protocol – problems and solutions**. Connecticut Transportation Institute, University of Connecticut, April 2003. 70p.

DRESCHER, A; NEWCOMB, D. E.; ZHANG, W. **Interpretation of the indirect tension test based on viscoelasticity**. Preprint of the 76th Transportation Research Board Annual Meeting. Article no. 970962, CD-ROM, Washington, D. C., 1997.

DURHAM, G.N.; MARR, W.A.; DEGROFF, W.L. **Resilient modulus testing for pavement components**. STP1437 – ASTM International. Ann Arbor/MI. 2003.

FAIRHURST, C. E.; KIM, Y. R.; KHOSLA, N. P. Resilient modulus testing of asphalt specimens in accordance with ASTM D4123-92. **Proceedings, RILEM Fourth International Symposium**, Budapest, Hungary, October 1990.

FALCÃO, M. F. B.; SOARES, J. B. Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no estudo de materiais de pavimentação. In: XVI CONGRESSO DE ENSINO E PESQUISA EM TRANSPORTES – ANPET, v. 1, p. 169-181, 2002, Natal. **Anais...** 2002.

Federal Highway Administration. **Test Method for Determining the Creep Compliance, Resilient Modulus and Strength of Asphalt Materials Using the Indirect Tensile Test Device**. FHWA-LTPP Protocol P07. Version 1.1. August 2001.

FONSECA, O. A.; WITCZAK, M. W. A prediction methodology for the dynamic modulus of in-place aged asphalt mixtures. **Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 61, p. 532-559, 1996.

FREITAS, F. A. C. **Modelagem na formação e propagação de trincas em misturas betuminosas através de trincas pelo método dos elementos finitos**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

FROCHT, M.M. **Photoelasticity**. v. II. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1948.

GIBSON, N. H.; SCHWARTZ, C. W.; SCHAPERY, R.A. e WITCZAK, M. W. **Viscoelastic, viscoplastic and damage modeling of asphalt concrete in unconfined compression**. Transportation Research Board 2002 Annual Meeting, CD-ROM, 2002.

GONÇALVES, F. J. P. **Estudo experimental do desempenho de pavimentos flexíveis a partir de instrumentação e ensaios acelerados**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GONÇALVES, F. J. P.; RODRIGUES, R. M. **Determinação em laboratório da lei de fadiga de concretos asfálticos**. Pavesys Engenharia LTDA. Relatório Técnico, 2004. 20p.

HEINICKE, J. J.; VINSON, T. S. Effect of test conditions parameters on IRM. **Journal of Transportation Engineering**, ASCE, v. 114, n. 2, p. 153-172, 1988.

HERTZ, H. Z. **Math. U. Phys.** v. 28, p. 125-131, 1883.

HICKS, R. G.; EPPS, J. A. **Life cycle cost analysis of asphalt-rubber paving materials**. Final report to Rubber Pavements Association, 1999.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. 2nd ed.. New Jersey: Prentice Hall, 2004. 775p.

HUGO, F.; NACHENIUS, R. Some properties of bitumen-rubber asphalt and binders. **Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 58, p. 303-336, 1989.

KIM, Y. R. **Evaluation of healing and constitutive modeling of asphalt concrete by means of the theory of nonlinear viscoelasticity and damage models**. 1988. Tese (Doutorado em Engenharia) – Texas A&M University, Estados Unidos.

KIM, Y. R.; WEN, H. Fracture energy from indirect tension testing. **Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists**, 2002. 18p.

LA ROCHE, C. **Propriétés mécanique des enrobés bitumineux, comportement, module, fatigue**. Mastere Infrastructure des Transport – Module Materiaux. École Nationale des Ponts et Chaussées, Avril 2004.

LOULIZI, A.; FLINTSCH, G. W.; AL-QADI, I. L.; MOKAREM, D. **Comparison between resilient modulus and dynamic modulus of hot-mix asphalt as material properties from flexible pavement design**. Transportation Research Board 85th annual meeting, CD-ROM, Washington, D. C., 2006. 21p.

LOUREIRO, T. G. **Estudo da evolução do dano por fadiga em misturas asfálticas**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

MARQUES, G. L. O. **Utilização de módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

MCGEE, N. Laboratory MR investigation of 2331 mix. **Proceedings of the Workshop on Resilient Modulus Testing**, Oregon State University, Corvallis, Oregon, 1999.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. M. Análise do Pulso de Carga em Pavimentos. In: 29^a REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, p. 418-449, 1995, Cuiabá. **Anais...** 1995.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2005. 574p.

MIGUENS, A. P. **A ciência e a arte. Volume II – Navegação astronômica e derrotas**. Disponível em: <http://www.mar.mil.br/dhn/bhm/publicacao/download/apcap17.pdf>. Acesso em: 16.02.2006. Apêndice Capítulo 17.

MONISMITH, C. L.; EPPS, J. A.; KASIANCHUK, D. A.; MCLEAN, D. B. **Asphalt mixture behavior in repeated flexure**. Report No. TE-70-5, Office of Research Services, University of California, Berkeley, December 1970.

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.

MOURA, E.; BERNUCCI, L. L. B. Estudo 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, 2004, Florianópolis. **Anais...** 2004.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. 1991. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

PAIS, J.; PEREIRA, P. A influência da temperatura na rigidez das misturas betuminosas. In: 2º CONGRESSO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS – ESTRADA 2002, 2002, Lisboa. **Anais...** 2002.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. 1991. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

PREUSSLER, E. S. **Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço**. 1983. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

PREUSSLER, E.S.; PINTO, S. **Módulos resilientes de concretos asfálticos**. In: 5º ENCONTRO DO ASFALTO DO INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, 1994. **Anais...** 1994.

QUEIROZ, C. A. V.; VISSER, A. T. Uma investigação dos módulos de resiliência de revestimentos betuminosos brasileiros. In: XIV REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 1978. **Anais...** 1978.

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

SANGATA, E.; BASSANI, M. Improved use of the repeated load indirect tensile test. **Proceedings of the 3rd European symposium on performance and durability of bituminous materials and hydraulic stabilized composites**, p. 493-516, Leeds, 1999.

SCHIMIDT, R. J. A practical method for measuring resilient modulus of asphalt-treated mixes. **Highway Research Record No. 404**, TRB, Washington, D. C., p.22-32, 1972.

SOUZA, F. V. **Modelo multi-escala para análise estrutural de compósitos viscoelásticos suscetíveis ao dano**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

THEISEN, K. M.; BRITO, L. A. T.; NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P. Modelagem 3D para cálculo do módulo de resiliência em corpos de prova cilíndricos através do método dos elementos finitos. In: III SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA – GEORS, 2005, Passo Fundo. **Anais...** 2005.

ULLIDTZ, P. **Pavement Analysis**. New York: Elsevier Science Publishing Company Inc., 1987. 318p.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Design**. 2 ed. New York: John Wiley, 1975. 711p.

VIANNA, A. A. D. **Contribuição para o estabelecimento de um material padrão e de metodologia para calibração de equipamentos de ensaios dinâmicos**. 2002. Tese (Mestrado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

WALLACE, K.; MONISMITH, C. L. Diametral modulus testing on nonlinear pavement materials. **Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 49, Louisville, 1980.

WIDYATMOKO, I. Some practical aspects of performance related testing of bituminous materials. In: EUROPEAN SYMPOSIUM ON PERFORMANCE OF BITUMINOUS AND HYDRAULIC MATERIALS IN PAVEMENT. Zoorob, Collop e Brow, editors. 2002, Nottingham. **Proceedings...** p. 99-104, Nottingham, 2002.

WITCZAK, M. W. **Development of regression model for asphalt concrete modulus for use in MS-1 study.** Research Report, University of Maryland, College Park, 1978.

WITCZAK, M. W.; LEAHY, R. B.; CAVES; UZAN J. **The universal airport pavement design system, report II: asphaltic mixture material Characterization.** University of Maryland, May 1989.

WITCZAK, M. W. **Harmonized test methods for laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design.** Responsible Officer: Edward T. Harrigan. Project 1-28A, Final Report, Research Result Digest N° 285, University of Maryland, 2004. 48p.

WRIGHT, P. J. F. Comments on an indirect tensile test for concrete. **Mag. Concrete Res**, v. 20, p. 87-96, 1955.

ZHANG, W.; DRESCHER, A.; NEWCOMB, D.E. Viscoelastic analysis of diametral compression of asphalt concrete. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 123, n. 6, p. 596-603, 1997.

ANEXO A

Ensaio CA-C

| N° | Grupo | CP | 2R (cm) | t (cm) | VV (%) | Rt _k (MPa) | Código | Ensaio | | | |
|----|-------|------|---------|--------|--------|-----------------------|--|-----------|------------|-----------|------|
| | | | | | | | | Temp (°C) | Freq. (Hz) | Pulso (s) | % Rt |
| 1 | 1 | 8/3 | 10,2 | 6,30 | 2,11% | 0,87 | Rt @ 35°C | 35 | | | |
| 2 | 1 | 11/5 | 10,2 | 6,42 | 2,84% | 0,87 | Rt @ 35°C | 35 | | | |
| 3 | 1 | 6/9 | 10,2 | 6,41 | 3,88% | 0,87 | Rt @ 35°C | 35 | | | |
| 4 | 2 | 9/4 | 10,2 | 6,26 | 2,11% | 0,87 | MR @ 35°C (1Hz; 0.10 seg; 15%) | 35 | 1 | 0,10 | 15 |
| 5 | 2 | 9/4 | 10,2 | 6,26 | 2,11% | 0,87 | MR @ 35°C (1Hz; 0.10 seg; 40%) | 35 | 1 | 0,10 | 40 |
| 6 | 2 | 2/3 | 10,2 | 6,33 | 2,87% | 0,87 | MR @ 35°C (1Hz; 0.10 seg; 15%) | 35 | 1 | 0,10 | 15 |
| 7 | 2 | 2/3 | 10,2 | 6,33 | 2,87% | 0,87 | MR @ 35°C (1Hz; 0.10 seg; 40%) | 35 | 1 | 0,10 | 40 |
| 8 | 2 | 6/2 | 10,2 | 6,43 | 3,88% | 0,87 | MR @ 35°C (1Hz; 0.10 seg; 15%) | 35 | 1 | 0,10 | 15 |
| 9 | 2 | 6/2 | 10,2 | 6,43 | 3,88% | 0,87 | MR @ 35°C (1Hz; 0.10 seg; 40%) | 35 | 1 | 0,10 | 40 |
| 10 | 3 | 9/8 | 10,2 | 6,26 | 2,12% | 0,87 | MR @ 35°C (3Hz; 0.10 seg; 15%) | 35 | 3 | 0,10 | 15 |
| 11 | 3 | 3/4 | 10,2 | 6,34 | 2,84% | 0,87 | MR @ 35°C (3Hz; 0.10 seg; 15%) | 35 | 3 | 0,10 | 15 |
| 12 | 3 | 4/8 | 10,2 | 6,41 | 3,86% | 0,87 | MR @ 35°C (3Hz; 0.10 seg; 15%) | 35 | 3 | 0,10 | 15 |
| 13 | 4 | 9/7 | 10,2 | 6,25 | 2,14% | 0,87 | MR @ 35°C (5Hz; 0.10 seg; 15%) | 35 | 5 | 0,10 | 15 |
| 14 | 4 | 10/9 | 10,2 | 6,32 | 2,88% | 0,87 | MR @ 35°C (5Hz; 0.10 seg; 15%) | 35 | 5 | 0,10 | 15 |
| 15 | 4 | 6/8 | 10,2 | 6,42 | 3,85% | 0,87 | MR @ 35°C (5Hz; 0.10 seg; 15%) | 35 | 5 | 0,10 | 15 |
| 16 | 5 | 9/9 | 10,2 | 6,25 | 2,15% | 0,87 | MR @ 35°C (1Hz; 0.15 seg; 15%) | 35 | 1 | 0,15 | 15 |
| 17 | 5 | 11/4 | 10,2 | 6,40 | 2,80% | 0,87 | MR @ 35°C (1Hz; 0.15 seg; 15%) | 35 | 1 | 0,15 | 15 |
| 18 | 5 | 5/10 | 10,2 | 6,41 | 3,76% | 0,87 | MR @ 35°C (1Hz; 0.15 seg; 15%) | 35 | 1 | 0,15 | 15 |
| 19 | 6 | 8/5 | 10,2 | 6,31 | 2,21% | 0,87 | MR @ 35°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso1 | 35 | 1 | 0,20 | 15 |
| 20 | 6 | 8/5 | 10,2 | 6,31 | 2,21% | 0,87 | MR @ 35°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso2 | 35 | 1 | 0,20 | 15 |
| 21 | 6 | 7/3 | 10,2 | 6,38 | 2,91% | 0,87 | MR @ 35°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso1 | 35 | 1 | 0,20 | 15 |
| 22 | 6 | 7/3 | 10,2 | 6,38 | 2,91% | 0,87 | MR @ 35°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso2 | 35 | 1 | 0,20 | 15 |
| 23 | 6 | 5/2 | 10,2 | 6,41 | 3,73% | 0,87 | MR @ 35°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso1 | 35 | 1 | 0,20 | 15 |
| 24 | 6 | 5/2 | 10,2 | 6,41 | 3,73% | 0,87 | MR @ 35°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso2 | 35 | 1 | 0,20 | 15 |
| 25 | 7 | 9/2 | 10,2 | 6,30 | 2,24% | 0,87 | MR @ 35°C (1Hz; 0.10 seg; 30%) | 35 | 1 | 0,10 | 30 |
| 26 | 7 | 10/6 | 10,2 | 6,33 | 2,73% | 0,87 | MR @ 35°C (1Hz; 0.10 seg; 30%) | 35 | 1 | 0,10 | 30 |
| 27 | 7 | 5/3 | 10,2 | 6,42 | 3,71% | 0,87 | MR @ 35°C (1Hz; 0.10 seg; 30%) | 35 | 1 | 0,10 | 30 |
| 28 | 11 | 8/2 | 10,2 | 6,30 | 2,36% | 1,73 | Rt @ 25°C | 25 | | | |
| 29 | 11 | 4/1 | 10,2 | 6,35 | 2,71% | 1,73 | Rt @ 25°C | 25 | | | |
| 30 | 11 | 3/3 | 10,2 | 6,35 | 3,53% | 1,73 | Rt @ 25°C | 25 | | | |
| 31 | 22 | 2/2 | 10,2 | 6,30 | 2,50% | 1,73 | MR @ 25°C (1Hz; 0.10 seg; 15%) | 25 | 1 | 0,10 | 15 |
| 32 | 22 | 2/2 | 10,2 | 6,30 | 2,50% | 1,73 | MR @ 25°C (1Hz; 0.10 seg; 40%) | 25 | 1 | 0,10 | 40 |
| 33 | 22 | 4/4 | 10,2 | 6,34 | 3,06% | 1,73 | MR @ 25°C (1Hz; 0.10 seg; 15%) | 25 | 1 | 0,10 | 15 |
| 34 | 22 | 4/4 | 10,2 | 6,34 | 3,06% | 1,73 | MR @ 25°C (1Hz; 0.10 seg; 40%) | 25 | 1 | 0,10 | 40 |
| 35 | 22 | 6/4 | 10,2 | 6,45 | 3,27% | 1,73 | MR @ 25°C (1Hz; 0.10 seg; 15%) | 25 | 1 | 0,10 | 15 |
| 36 | 22 | 6/4 | 10,2 | 6,45 | 3,27% | 1,73 | MR @ 25°C (1Hz; 0.10 seg; 40%) | 25 | 1 | 0,10 | 40 |
| 37 | 23 | 8/1 | 10,2 | 6,34 | 2,51% | 1,73 | MR @ 25°C (3Hz; 0.10 seg; 15%) | 25 | 3 | 0,10 | 15 |
| 38 | 23 | 3/6 | 10,2 | 6,30 | 2,65% | 1,73 | MR @ 25°C (3Hz; 0.10 seg; 15%) | 25 | 3 | 0,10 | 15 |
| 39 | 23 | 3/7 | 10,2 | 6,34 | 3,27% | 1,73 | MR @ 25°C (3Hz; 0.10 seg; 15%) | 25 | 3 | 0,10 | 15 |
| 40 | 24 | 11/6 | 10,2 | 6,32 | 2,51% | 1,73 | MR @ 25°C (5Hz; 0.10 seg; 15%) | 25 | 5 | 0,10 | 15 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|----|------|------|------|-------|------|--|----|---|------|----|
| 41 | 24 | 2/9 | 10,2 | 6,35 | 3,06% | 1,73 | MR @ 25°C (5Hz; 0.10 seg; 15%) | 25 | 5 | 0,10 | 15 |
| 42 | 24 | 4/2 | 10,2 | 6,32 | 3,27% | 1,73 | MR @ 25°C (5Hz; 0.10 seg; 15%) | 25 | 5 | 0,10 | 15 |
| 43 | 25 | 10/4 | 10,2 | 6,32 | 2,54% | 1,73 | MR @ 25°C (1Hz; 0.15 seg; 15%) | 25 | 1 | 0,15 | 15 |
| 44 | 25 | 2/4 | 10,2 | 6,32 | 2,64% | 1,73 | MR @ 25°C (1Hz; 0.15 seg; 15%) | 25 | 1 | 0,15 | 15 |
| 45 | 25 | 4/9 | 10,2 | 6,40 | 3,26% | 1,73 | MR @ 25°C (1Hz; 0.15 seg; 15%) | 25 | 1 | 0,15 | 15 |
| 46 | 26 | 7/6 | 10,2 | 6,31 | 2,55% | 1,73 | MR @ 25°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso1 | 25 | 1 | 0,20 | 15 |
| 47 | 26 | 7/6 | 10,2 | 6,31 | 2,55% | 1,73 | MR @ 25°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso2 | 25 | 1 | 0,20 | 15 |
| 48 | 26 | 3/2 | 10,2 | 6,38 | 3,11% | 1,73 | MR @ 25°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso1 | 25 | 1 | 0,20 | 15 |
| 49 | 26 | 3/2 | 10,2 | 6,38 | 3,11% | 1,73 | MR @ 25°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso2 | 25 | 1 | 0,20 | 15 |
| 50 | 26 | 6/3 | 10,2 | 6,34 | 3,26% | 1,73 | MR @ 25°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso1 | 25 | 1 | 0,20 | 15 |
| 51 | 26 | 6/3 | 10,2 | 6,34 | 3,26% | 1,73 | MR @ 25°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso2 | 25 | 1 | 0,20 | 15 |
| 52 | 27 | 7/2 | 10,2 | 6,34 | 2,57% | 1,73 | MR @ 25°C (1Hz; 0.10 seg; 30%) | 25 | 1 | 0,10 | 30 |
| 53 | 27 | 2/1 | 10,2 | 6,36 | 2,64% | 1,73 | MR @ 25°C (1Hz; 0.10 seg; 30%) | 25 | 1 | 0,10 | 30 |
| 54 | 27 | 5/5 | 10,2 | 6,38 | 3,25% | 1,73 | MR @ 25°C (1Hz; 0.10 seg; 30%) | 25 | 1 | 0,10 | 30 |
| 55 | 28 | 6/1 | 10,2 | 6,33 | 2,58% | 1,73 | Fadiga @ 25°C (1Hz; 0.10 seg) | 25 | 1 | 0,10 | 40 |
| 56 | 28 | 11/9 | 10,2 | 6,40 | 3,16% | 1,73 | Fadiga @ 25°C (1Hz; 0.10 seg) | 25 | 1 | 0,10 | 35 |
| 57 | 28 | 3/8 | 10,2 | 6,34 | 3,25% | 1,73 | Fadiga @ 25°C (1Hz; 0.10 seg) | 25 | 1 | 0,10 | 30 |
| 58 | 29 | 9/10 | 10,2 | 6,34 | 2,59% | 1,73 | Fadiga @ 25°C (1Hz; 0.10 seg) | 25 | 1 | 0,10 | 25 |
| 59 | 29 | 9/5 | 10,2 | 6,30 | 2,61% | 1,73 | Fadiga @ 25°C (1Hz; 0.10 seg) | 25 | 1 | 0,10 | 20 |
| 60 | 29 | 3/9 | 10,2 | 6,34 | 3,24% | 1,73 | Fadiga @ 25°C (1Hz; 0.10 seg) | 25 | 1 | 0,10 | 15 |
| 61 | 30 | 2/8 | 10,2 | 6,37 | 2,60% | 1,73 | Fadiga @ 25°C (1Hz; 0.10 seg) | 25 | 1 | 0,10 | 10 |
| 62 | 21 | 10/5 | 10,2 | 6,30 | 2,49% | 4,31 | Rt @ 10°C | 10 | | | |
| 63 | 21 | 10/8 | 10,2 | 6,34 | 2,66% | 4,31 | Rt @ 10°C | 10 | | | |
| 64 | 21 | 2/7 | 10,2 | 6,37 | 3,32% | 4,31 | Rt @ 10°C | 10 | | | |
| 65 | 12 | 7/8 | 10,2 | 6,36 | 2,39% | 4,31 | MR @ 10°C (1Hz; 0.10 seg; 15%) | 10 | 1 | 0,10 | 15 |
| 66 | 12 | 2/5 | 10,2 | 6,34 | 2,95% | 4,31 | MR @ 10°C (1Hz; 0.10 seg; 15%) | 10 | 1 | 0,10 | 15 |
| 67 | 12 | 5/8 | 10,2 | 6,38 | 3,50% | 4,31 | MR @ 10°C (1Hz; 0.10 seg; 15%) | 10 | 1 | 0,10 | 15 |
| 68 | 13 | 9/1 | 10,2 | 6,32 | 2,42% | 4,31 | MR @ 10°C (3Hz; 0.10 seg; 15%) | 10 | 3 | 0,10 | 15 |
| 69 | 13 | 8/9 | 10,2 | 6,40 | 2,71% | 4,31 | MR @ 10°C (3Hz; 0.10 seg; 15%) | 10 | 3 | 0,10 | 15 |
| 70 | 13 | 7/10 | 10,2 | 6,38 | 3,48% | 4,31 | MR @ 10°C (3Hz; 0.10 seg; 15%) | 10 | 3 | 0,10 | 15 |
| 71 | 14 | 9/6 | 10,2 | 6,30 | 2,43% | 4,31 | MR @ 10°C (5Hz; 0.10 seg; 15%) | 10 | 5 | 0,10 | 15 |
| 72 | 14 | 4/7 | 10,2 | 6,39 | 2,96% | 4,31 | MR @ 10°C (5Hz; 0.10 seg; 15%) | 10 | 5 | 0,10 | 15 |
| 73 | 14 | 5/6 | 10,2 | 6,41 | 3,46% | 4,31 | MR @ 10°C (5Hz; 0.10 seg; 15%) | 10 | 5 | 0,10 | 15 |
| 74 | 15 | 11/1 | 10,2 | 6,33 | 2,45% | 4,31 | MR @ 10°C (1Hz; 0.15 seg; 15%) | 10 | 1 | 0,15 | 15 |
| 75 | 15 | 9/3 | 10,2 | 6,37 | 2,68% | 4,31 | MR @ 10°C (1Hz; 0.15 seg; 15%) | 10 | 1 | 0,15 | 15 |
| 76 | 15 | 5/4 | 10,2 | 6,46 | 3,45% | 4,31 | MR @ 10°C (1Hz; 0.15 seg; 15%) | 10 | 1 | 0,15 | 15 |
| 77 | 16 | 8/6 | 10,2 | 6,27 | 2,46% | 4,31 | MR @ 10°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso1 | 10 | 1 | 0,20 | 15 |
| 78 | 16 | 8/6 | 10,2 | 6,27 | 2,46% | 4,31 | MR @ 10°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso2 | 10 | 1 | 0,20 | 15 |
| 79 | 16 | 11/2 | 10,2 | 6,37 | 2,98% | 4,31 | MR @ 10°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso1 | 10 | 1 | 0,20 | 15 |
| 80 | 16 | 11/2 | 10,2 | 6,37 | 2,98% | 4,31 | MR @ 10°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso2 | 10 | 1 | 0,20 | 15 |
| 81 | 16 | 6/6 | 10,2 | 6,36 | 3,45% | 4,31 | MR @ 10°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso1 | 10 | 1 | 0,20 | 15 |
| 82 | 16 | 6/6 | 10,2 | 6,36 | 3,45% | 4,31 | MR @ 10°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso2 | 10 | 1 | 0,20 | 15 |
| 83 | 17 | 11/8 | 10,2 | 6,34 | 2,47% | 4,31 | MR @ 10°C (1Hz; 0.10 seg; 10%) | 10 | 1 | 0,10 | 10 |
| 84 | 17 | 11/8 | 10,2 | 6,34 | 2,47% | 4,31 | MR @ 10°C (1Hz; 0.10 seg; 30%) | 10 | 1 | 0,10 | 30 |
| 85 | 17 | 7/4 | 10,2 | 6,33 | 2,67% | 4,31 | MR @ 10°C (1Hz; 0.10 seg; 10%) | 10 | 1 | 0,10 | 10 |
| 86 | 17 | 7/4 | 10,2 | 6,33 | 2,67% | 4,31 | MR @ 10°C (1Hz; 0.10 seg; 30%) | 10 | 1 | 0,10 | 30 |
| 87 | 17 | 4/5 | 10,2 | 6,36 | 3,39% | 4,31 | MR @ 10°C (1Hz; 0.10 seg; 10%) | 10 | 1 | 0,10 | 10 |
| 88 | 17 | 4/5 | 10,2 | 6,36 | 3,39% | 4,31 | MR @ 10°C (1Hz; 0.10 seg; 30%) | 10 | 1 | 0,10 | 30 |

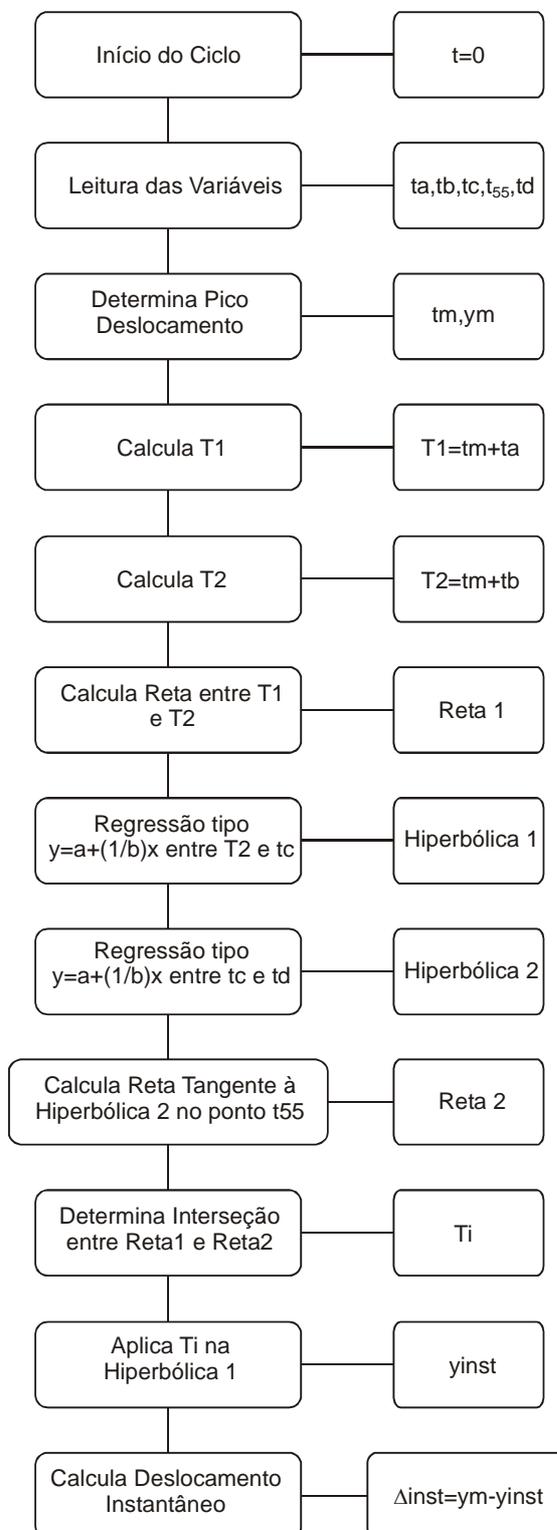
Ensaio CA-AB

| N° | Grupo | CP | 2R (cm) | t (cm) | VV (%) | Rt _k (MPa) | Código | Ensaio | | | |
|----|-------|----|---------|--------|--------|-----------------------|--|-----------|------------|-----------|------|
| | | | | | | | | Temp (°C) | Freq. (Hz) | Pulso (s) | % Rt |
| 1 | 1 | 1A | 10,2 | 6,39 | 3,03% | 1,02 | Rt @ 35°C | 35 | | | |
| 2 | 1 | 3E | 10,2 | 6,36 | 3,92% | 1,02 | Rt @ 35°C | 35 | | | |
| 3 | 1 | 6C | 10,2 | 6,56 | 5,31% | 1,02 | Rt @ 35°C | 35 | | | |
| 4 | 2 | 1L | 10,2 | 6,33 | 3,03% | 1,02 | MR @ 35°C (1Hz; 0.10 seg; 15%) | 35 | 1 | 0,10 | 15 |
| 5 | 2 | 1L | 10,2 | 6,33 | 3,03% | 1,02 | MR @ 35°C (1Hz; 0.10 seg; 40%) | 35 | 1 | 0,10 | 40 |
| 6 | 2 | 6K | 10,2 | 6,44 | 3,94% | 1,02 | MR @ 35°C (1Hz; 0.10 seg; 15%) | 35 | 1 | 0,10 | 15 |
| 7 | 2 | 6K | 10,2 | 6,44 | 3,94% | 1,02 | MR @ 35°C (1Hz; 0.10 seg; 40%) | 35 | 1 | 0,10 | 40 |
| 8 | 2 | 6I | 10,2 | 6,44 | 5,15% | 1,02 | MR @ 35°C (1Hz; 0.10 seg; 15%) | 35 | 1 | 0,10 | 15 |
| 9 | 2 | 6I | 10,2 | 6,44 | 5,15% | 1,02 | MR @ 35°C (1Hz; 0.10 seg; 40%) | 35 | 1 | 0,10 | 40 |
| 10 | 3 | 1D | 10,2 | 6,23 | 3,13% | 1,02 | MR @ 35°C (3Hz; 0.10 seg; 15%) | 35 | 3 | 0,10 | 15 |
| 11 | 3 | 1G | 10,2 | 6,33 | 3,91% | 1,02 | MR @ 35°C (3Hz; 0.10 seg; 15%) | 35 | 3 | 0,10 | 15 |
| 12 | 3 | 3F | 10,2 | 6,44 | 5,09% | 1,02 | MR @ 35°C (3Hz; 0.10 seg; 15%) | 35 | 3 | 0,10 | 15 |
| 13 | 4 | 3L | 10,2 | 6,34 | 3,13% | 1,02 | MR @ 35°C (5Hz; 0.10 seg; 15%) | 35 | 5 | 0,10 | 15 |
| 14 | 4 | 1B | 10,2 | 6,48 | 3,94% | 1,02 | MR @ 35°C (5Hz; 0.10 seg; 15%) | 35 | 5 | 0,10 | 15 |
| 15 | 4 | 1F | 10,2 | 6,41 | 5,06% | 1,02 | MR @ 35°C (5Hz; 0.10 seg; 15%) | 35 | 5 | 0,10 | 15 |
| 16 | 5 | 5L | 10,2 | 6,37 | 3,22% | 1,02 | MR @ 35°C (1Hz; 0.15 seg; 15%) | 35 | 1 | 0,15 | 15 |
| 17 | 5 | 4D | 10,2 | 6,36 | 3,90% | 1,02 | MR @ 35°C (1Hz; 0.15 seg; 15%) | 35 | 1 | 0,15 | 15 |
| 18 | 5 | 3C | 10,2 | 6,53 | 5,01% | 1,02 | MR @ 35°C (1Hz; 0.15 seg; 15%) | 35 | 1 | 0,15 | 15 |
| 19 | 6 | 1O | 10,2 | 6,34 | 3,24% | 1,02 | MR @ 35°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso1 | 35 | 1 | 0,20 | 15 |
| 20 | 6 | 1O | 10,2 | 6,34 | 3,24% | 1,02 | MR @ 35°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso2 | 35 | 1 | 0,20 | 15 |
| 21 | 6 | 5E | 10,2 | 6,39 | 4,00% | 1,02 | MR @ 35°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso1 | 35 | 1 | 0,20 | 15 |
| 22 | 6 | 5E | 10,2 | 6,39 | 4,00% | 1,02 | MR @ 35°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso2 | 35 | 1 | 0,20 | 15 |
| 23 | 6 | 1C | 10,2 | 6,55 | 4,97% | 1,02 | MR @ 35°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso1 | 35 | 1 | 0,20 | 15 |
| 24 | 6 | 1C | 10,2 | 6,55 | 4,97% | 1,02 | MR @ 35°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso2 | 35 | 1 | 0,20 | 15 |
| 25 | 7 | 6L | 10,2 | 6,38 | 3,26% | 1,02 | MR @ 35°C (1Hz; 0.10 seg; 30%) | 35 | 1 | 0,10 | 30 |
| 26 | 7 | 4E | 10,2 | 6,39 | 3,88% | 1,02 | MR @ 35°C (1Hz; 0.10 seg; 30%) | 35 | 1 | 0,10 | 30 |
| 27 | 7 | 4C | 10,2 | 6,51 | 4,95% | 1,02 | MR @ 35°C (1Hz; 0.10 seg; 30%) | 35 | 1 | 0,10 | 30 |
| 28 | 10 | 2J | 10,2 | 6,29 | 3,30% | 1,70 | Rt @ 25°C | 25 | | | |
| 29 | 10 | 5B | 10,2 | 6,56 | 4,05% | 1,70 | Rt @ 25°C | 25 | | | |
| 30 | 10 | 1Q | 10,2 | 6,44 | 4,75% | 1,70 | Rt @ 25°C | 25 | | | |
| 31 | 11 | 3K | 10,2 | 6,31 | 3,33% | 1,70 | MR @ 25°C (1Hz; 0.10 seg; 15%) | 25 | 1 | 0,10 | 15 |
| 32 | 11 | 3K | 10,2 | 6,31 | 3,33% | 1,70 | MR @ 25°C (1Hz; 0.10 seg; 40%) | 25 | 1 | 0,10 | 40 |
| 33 | 11 | 6E | 10,2 | 6,38 | 3,88% | 1,70 | MR @ 25°C (1Hz; 0.10 seg; 15%) | 25 | 1 | 0,10 | 15 |
| 34 | 11 | 6E | 10,2 | 6,38 | 3,88% | 1,70 | MR @ 25°C (1Hz; 0.10 seg; 40%) | 25 | 1 | 0,10 | 40 |
| 35 | 11 | 5I | 10,2 | 6,46 | 4,75% | 1,70 | MR @ 25°C (1Hz; 0.10 seg; 15%) | 25 | 1 | 0,10 | 15 |
| 36 | 11 | 5I | 10,2 | 6,46 | 4,75% | 1,70 | MR @ 25°C (1Hz; 0.10 seg; 40%) | 25 | 1 | 0,10 | 40 |
| 37 | 12 | 2M | 10,2 | 6,41 | 3,41% | 1,70 | MR @ 25°C (3Hz; 0.10 seg; 15%) | 25 | 3 | 0,10 | 15 |
| 38 | 12 | 5M | 10,2 | 6,46 | 4,08% | 1,70 | MR @ 25°C (3Hz; 0.10 seg; 15%) | 25 | 3 | 0,10 | 15 |
| 39 | 12 | 4N | 10,2 | 6,48 | 4,74% | 1,70 | MR @ 25°C (3Hz; 0.10 seg; 15%) | 25 | 3 | 0,10 | 15 |
| 40 | 13 | 6J | 10,2 | 6,31 | 3,42% | 1,70 | MR @ 25°C (5Hz; 0.10 seg; 15%) | 25 | 5 | 0,10 | 15 |

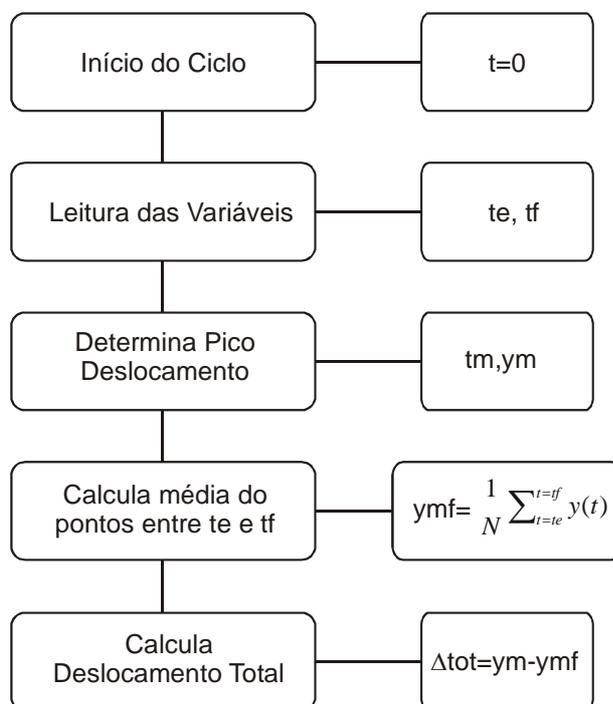
| | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|------|------|-------|------|--|----|---|------|----|
| 41 | 13 | 1I | 10,2 | 6,35 | 3,87% | 1,70 | MR @ 25°C (5Hz; 0.10 seg; 15%) | 25 | 5 | 0,10 | 15 |
| 42 | 13 | 5A | 10,2 | 6,61 | 4,66% | 1,70 | MR @ 25°C (5Hz; 0.10 seg; 15%) | 25 | 5 | 0,10 | 15 |
| 43 | 14 | 2A | 10,2 | 6,53 | 3,43% | 1,70 | MR @ 25°C (1Hz; 0.15 seg; 15%) | 25 | 1 | 0,15 | 15 |
| 44 | 14 | 1N | 10,2 | 6,47 | 4,08% | 1,70 | MR @ 25°C (1Hz; 0.15 seg; 15%) | 25 | 1 | 0,15 | 15 |
| 45 | 14 | 6N | 10,2 | 6,42 | 4,63% | 1,70 | MR @ 25°C (1Hz; 0.15 seg; 15%) | 25 | 1 | 0,15 | 15 |
| 46 | 15 | 6O | 10,2 | 6,38 | 3,43% | 1,70 | MR @ 25°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso1 | 25 | 1 | 0,20 | 15 |
| 47 | 15 | 6O | 10,2 | 6,38 | 3,43% | 1,70 | MR @ 25°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso2 | 25 | 1 | 0,20 | 15 |
| 48 | 15 | 3M | 10,2 | 6,39 | 3,86% | 1,70 | MR @ 25°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso1 | 25 | 1 | 0,20 | 15 |
| 49 | 15 | 3M | 10,2 | 6,39 | 3,86% | 1,70 | MR @ 25°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso2 | 25 | 1 | 0,20 | 15 |
| 50 | 15 | 5N | 10,2 | 6,45 | 4,53% | 1,70 | MR @ 25°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso1 | 25 | 1 | 0,20 | 15 |
| 51 | 15 | 5N | 10,2 | 6,45 | 4,53% | 1,70 | MR @ 25°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso2 | 25 | 1 | 0,20 | 15 |
| 52 | 16 | 4L | 10,2 | 6,37 | 3,45% | 1,70 | MR @ 25°C (1Hz; 0.10 seg; 30%) | 25 | 1 | 0,10 | 30 |
| 53 | 16 | 5Q | 10,2 | 6,40 | 4,09% | 1,70 | MR @ 25°C (1Hz; 0.10 seg; 30%) | 25 | 1 | 0,10 | 30 |
| 54 | 16 | 3Q | 10,2 | 6,43 | 4,50% | 1,70 | MR @ 25°C (1Hz; 0.10 seg; 30%) | 25 | 1 | 0,10 | 30 |
| 55 | 17 | 4H | 10,2 | 6,42 | 4,50% | 1,70 | Fadiga @ 25°C (1Hz; 0.10 seg) | 25 | 1 | 0,10 | 40 |
| 56 | 17 | 2O | 10,2 | 6,37 | 3,46% | 1,70 | Fadiga @ 25°C (1Hz; 0.10 seg) | 25 | 1 | 0,10 | 35 |
| 57 | 17 | 2D | 10,2 | 6,37 | 3,84% | 1,70 | Fadiga @ 25°C (1Hz; 0.10 seg) | 25 | 1 | 0,10 | 30 |
| 58 | 18 | 2Q | 10,2 | 6,37 | 4,09% | 1,70 | Fadiga @ 25°C (1Hz; 0.10 seg) | 25 | 1 | 0,10 | 25 |
| 59 | 18 | 5K | 10,2 | 6,35 | 3,49% | 1,70 | Fadiga @ 25°C (1Hz; 0.10 seg) | 25 | 1 | 0,10 | 20 |
| 60 | 18 | 2C | 10,2 | 6,52 | 4,49% | 1,70 | Fadiga @ 25°C (1Hz; 0.10 seg) | 25 | 1 | 0,10 | 15 |
| 61 | 29 | 4G | 10,2 | 6,34 | 3,72% | 1,70 | Fadiga @ 25°C (1Hz; 0.10 seg) | 25 | 1 | 0,10 | 10 |
| 62 | 19 | 2K | 10,2 | 6,32 | 3,50% | 3,40 | Rt @ 10°C | 10 | | | |
| 63 | 19 | 6Q | 10,2 | 6,43 | 3,82% | 3,40 | Rt @ 10°C | 10 | | | |
| 64 | 19 | 3B | 10,2 | 6,56 | 4,43% | 3,40 | Rt @ 10°C | 10 | | | |
| 65 | 20 | 1P | 10,2 | 6,40 | 3,51% | 3,40 | MR @ 10°C (1Hz; 0.10 seg; 15%) | 10 | 1 | 0,10 | 15 |
| 66 | 20 | 4Q | 10,2 | 6,37 | 4,11% | 3,40 | MR @ 10°C (1Hz; 0.10 seg; 15%) | 10 | 1 | 0,10 | 15 |
| 67 | 20 | 6H | 10,2 | 6,39 | 4,41% | 3,40 | MR @ 10°C (1Hz; 0.10 seg; 15%) | 10 | 1 | 0,10 | 15 |
| 68 | 21 | 1H | 10,2 | 6,37 | 3,52% | 3,40 | MR @ 10°C (3Hz; 0.10 seg; 15%) | 10 | 3 | 0,10 | 15 |
| 69 | 21 | 1E | 10,2 | 6,32 | 3,78% | 3,40 | MR @ 10°C (3Hz; 0.10 seg; 15%) | 10 | 3 | 0,10 | 15 |
| 70 | 21 | 3I | 10,2 | 6,39 | 4,36% | 3,40 | MR @ 10°C (3Hz; 0.10 seg; 15%) | 10 | 3 | 0,10 | 15 |
| 71 | 22 | 5P | 10,2 | 6,41 | 3,53% | 3,40 | MR @ 10°C (5Hz; 0.10 seg; 15%) | 10 | 5 | 0,10 | 15 |
| 72 | 22 | 5D | 10,2 | 6,39 | 4,12% | 3,40 | MR @ 10°C (5Hz; 0.10 seg; 15%) | 10 | 5 | 0,10 | 15 |
| 73 | 22 | 4F | 10,2 | 6,48 | 4,36% | 3,40 | MR @ 10°C (5Hz; 0.10 seg; 15%) | 10 | 5 | 0,10 | 15 |
| 74 | 23 | 6D | 10,2 | 6,34 | 3,55% | 3,40 | MR @ 10°C (1Hz; 0.15 seg; 15%) | 10 | 1 | 0,15 | 15 |
| 75 | 23 | 4K | 10,2 | 6,29 | 3,78% | 3,40 | MR @ 10°C (1Hz; 0.15 seg; 15%) | 10 | 1 | 0,15 | 15 |
| 76 | 23 | 6A | 10,2 | 6,57 | 4,35% | 3,40 | MR @ 10°C (1Hz; 0.15 seg; 15%) | 10 | 1 | 0,15 | 15 |
| 77 | 24 | 2G | 10,2 | 6,30 | 3,55% | 3,40 | MR @ 10°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso1 | 10 | 1 | 0,20 | 15 |
| 78 | 24 | 2G | 10,2 | 6,30 | 3,55% | 3,40 | MR @ 10°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso2 | 10 | 1 | 0,20 | 15 |
| 79 | 24 | 6G | 10,2 | 6,34 | 4,13% | 3,40 | MR @ 10°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso1 | 10 | 1 | 0,20 | 15 |
| 80 | 24 | 6G | 10,2 | 6,34 | 4,13% | 3,40 | MR @ 10°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso2 | 10 | 1 | 0,20 | 15 |
| 81 | 24 | 3N | 10,2 | 6,42 | 4,35% | 3,40 | MR @ 10°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso1 | 10 | 1 | 0,20 | 15 |
| 82 | 24 | 3N | 10,2 | 6,42 | 4,35% | 3,40 | MR @ 10°C (1Hz; 0.20 seg; 15%) Pulso2 | 10 | 1 | 0,20 | 15 |
| 83 | 25 | 6P | 10,2 | 6,32 | 3,58% | 3,40 | MR @ 10°C (1Hz; 0.10 seg; 10%) | 10 | 1 | 0,10 | 10 |
| 84 | 25 | 6P | 10,2 | 6,32 | 3,58% | 3,40 | MR @ 10°C (1Hz; 0.10 seg; 30%) | 10 | 1 | 0,10 | 30 |
| 85 | 25 | 6M | 10,2 | 6,35 | 3,76% | 3,40 | MR @ 10°C (1Hz; 0.10 seg; 10%) | 10 | 1 | 0,10 | 10 |
| 86 | 25 | 6M | 10,2 | 6,35 | 3,76% | 3,40 | MR @ 10°C (1Hz; 0.10 seg; 30%) | 10 | 1 | 0,10 | 30 |
| 87 | 25 | 4M | 10,2 | 6,42 | 4,34% | 3,40 | MR @ 10°C (1Hz; 0.10 seg; 10%) | 10 | 1 | 0,10 | 10 |
| 88 | 25 | 4M | 10,2 | 6,42 | 4,34% | 3,40 | MR @ 10°C (1Hz; 0.10 seg; 30%) | 10 | 1 | 0,10 | 30 |

ANEXO B

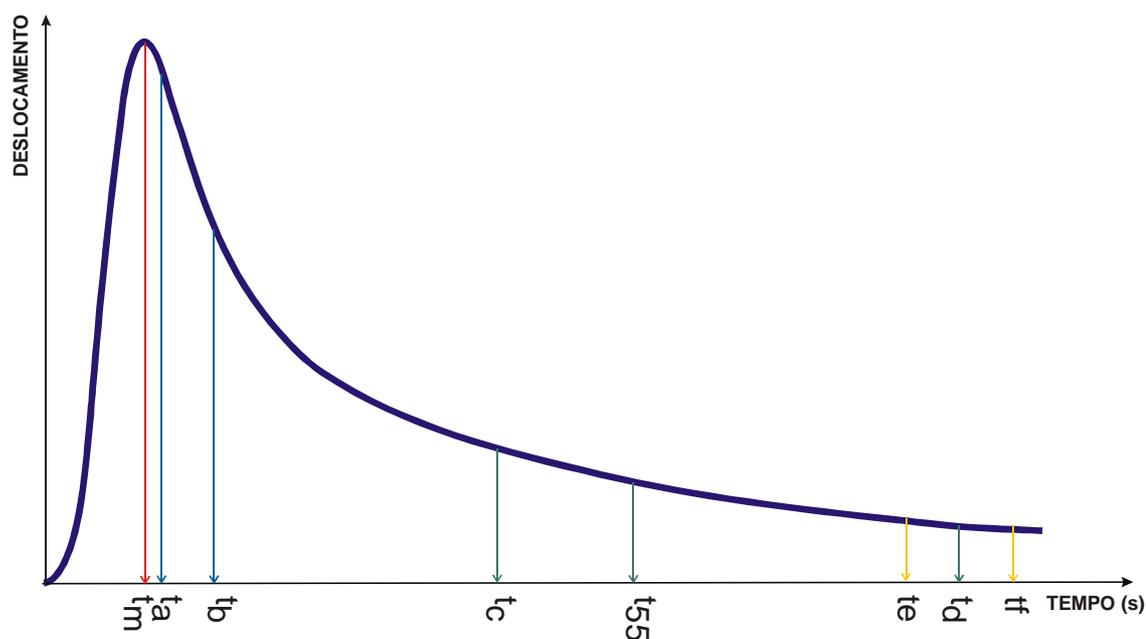
1. Esquema do algoritmo para determinação do deslocamento resiliente instantâneo segundo a pesquisa NCHRP 1-28/1-28A



2. Esquema do algoritmo para determinação do deslocamento resiliente total segundo a pesquisa NCHRP 1-28/1-28A



3. Referências no pulso de deslocamento



4. Recomendações dos tempos para determinação dos deslocamentos resilientes segundo a pesquisa NCHRP 1-28/1-28A

- $t_c = 40\%$ rest period
- $t_d = 90\%$ rest period
- $t_{55} = 55\%$ rest period
- $t_e = 85\%$ rest period
- $t_f = 95\%$ rest period

→ Considerando pulso de carga de 0,1s e tempo de descanso de 0,9s, vem:

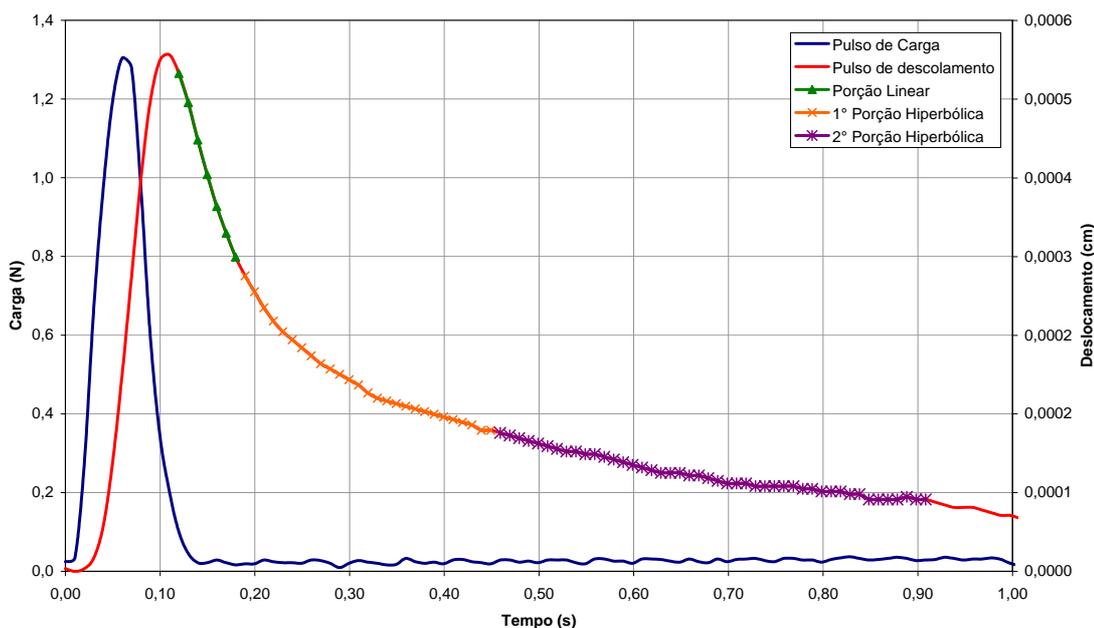
- $t_c = 0,46$
- $t_d = 0,91s$
- $t_{55} = 0,595s$
- $t_e = 0,865s$
- $t_f = 0,955s$

→ Recomendação para os tempos NÃO contemplados pela pesquisa NCHRP 1-28/1-28A

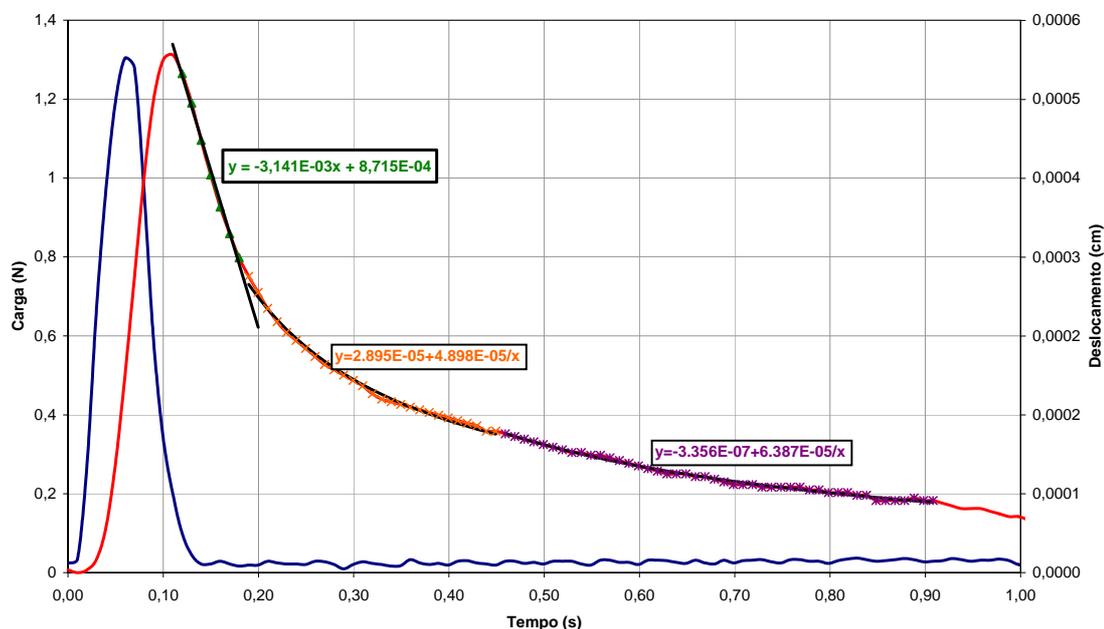
- $t_a = 0,005 + t_m$
- $t_b = t_m + \frac{1}{2}t_{\text{pulso de carga}}$ (no caso de t do pulso de carga de 0,1s, vem: $t_b = t_m + 0,05$)

5. Exemplo de cálculo

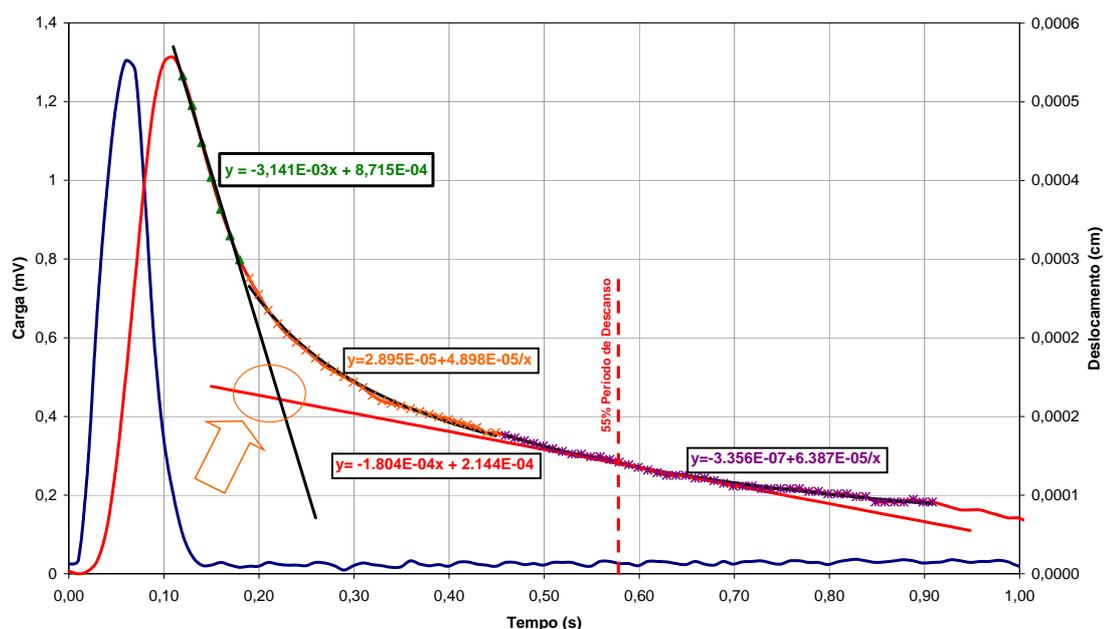
i. Separação das porções do pulso de deslocamento para determinação das regressões.



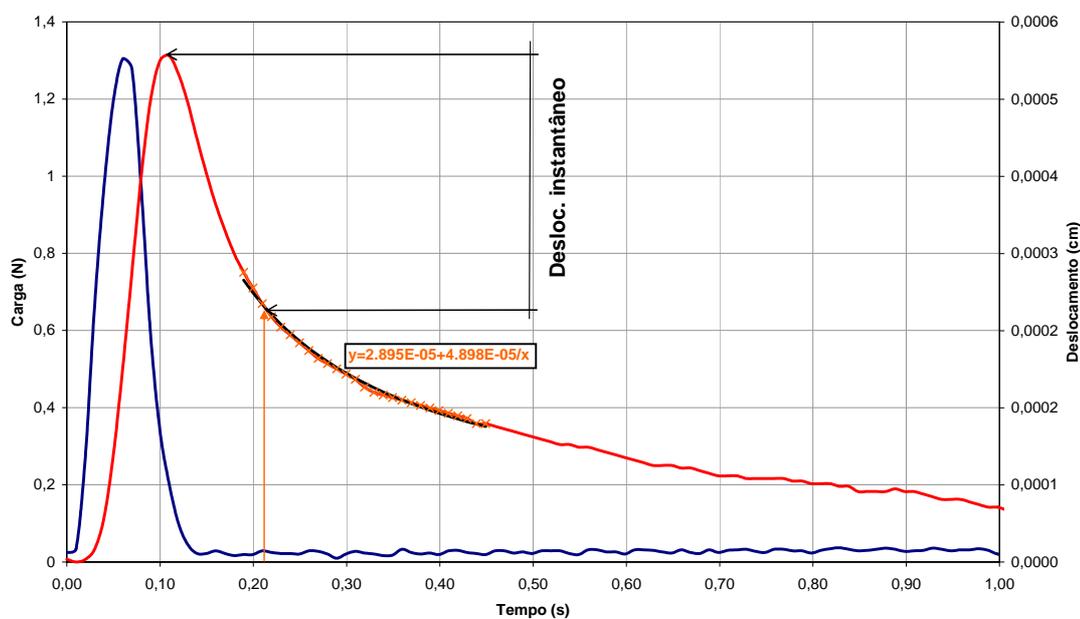
ii. Determinação das retas de regressões (1 regressão linear e 2 regressões hiperbólicas).



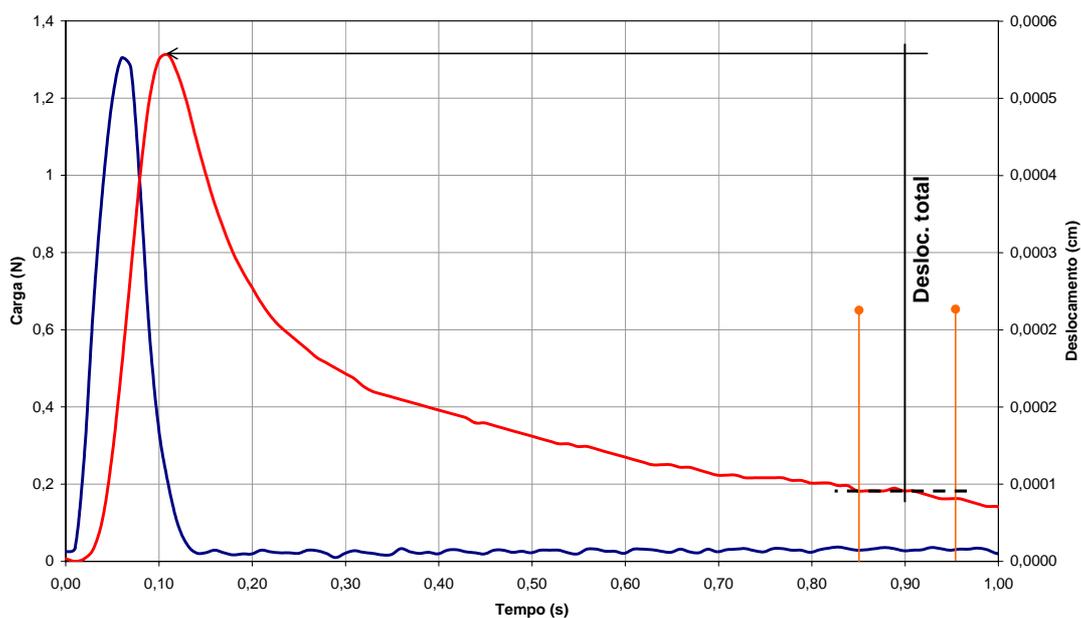
iii. Determinação da reta tangente à regressão hiperbólica 2 no ponto correspondente a 55% do período de descanso, e determinação do tempo correspondente à interseção desta com a reta de regressão linear (interseção*).



- iv. Determinação do deslocamento instantâneo – diferença entre o ponto de máximo deslocamento pela ordenada resultante da aplicação do tempo de interseção* na regressão hiperbólica 1.



- v. Determinação do deslocamento total através da diferença entre o ponto de máximo deslocamento e a ordenada média resultante da porção relativa à 85% - 95% do período de descanso.



ANEXO C

Ensaio CA-C

| Código | Algoritmo LTPP P07 s/ correção abaulamento | | | | | | | | | | Algoritmo LTPP P07 c/correção abaulamento | | | | | | | | | |
|------------------------------------|--|------------|-------------------------|------------|-------------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|---|------------|-------------------------|------------|-------------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|
| | v | | MR f(dh) - poiss=f-temp | | MR f(dv) - poiss=f-temp | | MR f(dh) - poiss=calc | | MR f(dv) - poiss=calc | | v | | MR f(dh) - poiss=f-temp | | MR f(dv) - poiss=f-temp | | MR f(dh) - poiss=calc | | MR f(dv) - poiss=calc | |
| | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. |
| MR@35°C (1Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,62 | 0,11 | 1580 | 286 | 1913 | 236 | 2004 | 222 | 2011 | 223 | 0,27 | 0,09 | 2115 | 366 | 1713 | 229 | 1639 | 227 | 1645 | 229 |
| MR@35°C (1Hz; 0.10 seg; 35%) | 0,71 | 0,11 | 1613 | 320 | 2098 | 286 | 2245 | 267 | 2253 | 268 | 0,35 | 0,09 | 2100 | 450 | 1917 | 260 | 1875 | 228 | 1882 | 228 |
| MR@35°C (3Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,44 | 0,04 | 2813 | 552 | 2855 | 464 | 2853 | 442 | 2863 | 444 | 0,48 | 0,25 | 2635 | 148 | 2776 | 598 | 2836 | 781 | 2846 | 783 |
| MR@35°C (5Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,52 | 0,02 | 2609 | 146 | 2908 | 197 | 2972 | 212 | 2983 | 213 | 0,62 | 0,18 | 2367 | 156 | 2844 | 278 | 2984 | 413 | 2995 | 414 |
| MR@35°C (1Hz; 0.15 seg; 11%) | 0,60 | 0,24 | 1798 | 728 | 2086 | 787 | 2183 | 880 | 2190 | 883 | 0,43 | 0,50 | 2241 | 1116 | 1954 | 840 | 2006 | 1088 | 2013 | 1091 |
| MR@35°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)ssv | 0,69 | 0,08 | 1559 | 267 | 2009 | 419 | 2141 | 475 | 2149 | 477 | 0,38 | 0,22 | 1937 | 153 | 1831 | 450 | 1823 | 558 | 1830 | 560 |
| MR@35°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)quad. | 0,53 | 0,05 | 1505 | 372 | 1688 | 400 | 1729 | 406 | 1736 | 407 | 0,16 | 0,07 | 2190 | 363 | 1501 | 373 | 1398 | 370 | 1403 | 371 |
| MR@35°C (1Hz; 0.10 seg; 25%) | 0,57 | 0,10 | 1840 | 66 | 2150 | 184 | 2229 | 237 | 2237 | 238 | 0,24 | 0,09 | 2487 | 176 | 1956 | 175 | 1863 | 209 | 1870 | 210 |
| MR@25°C (1Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,41 | 0,08 | 5735 | 1078 | 6222 | 1649 | 6314 | 1795 | 6337 | 1801 | 0,10 | 0,10 | 8518 | 928 | 5566 | 1550 | 5203 | 1605 | 5223 | 1611 |
| MR@25°C (1Hz; 0.10 seg; 35%) | 0,44 | 0,05 | 5965 | 851 | 6694 | 1231 | 6838 | 1331 | 6864 | 1336 | 0,21 | 0,03 | 7616 | 1076 | 6199 | 1118 | 5948 | 1118 | 5971 | 1122 |
| MR@25°C (3Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,47 | 0,04 | 4701 | 876 | 5422 | 829 | 5574 | 812 | 5595 | 815 | 0,13 | 0,03 | 6890 | 1380 | 4828 | 729 | 4531 | 657 | 4549 | 660 |
| MR@25°C (5Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,52 | 0,05 | 4397 | 261 | 5334 | 82 | 5555 | 96 | 5575 | 97 | 0,17 | 0,04 | 6320 | 564 | 4750 | 70 | 4503 | 76 | 4521 | 77 |
| MR@25°C (1Hz; 0.15 seg; 11%) | 0,57 | 0,10 | 3358 | 567 | 4259 | 760 | 4494 | 855 | 4510 | 858 | 0,22 | 0,08 | 4654 | 942 | 3819 | 656 | 3675 | 651 | 3689 | 654 |
| MR@25°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)ssv | 0,52 | 0,05 | 4064 | 467 | 4958 | 732 | 5170 | 811 | 5189 | 814 | 0,21 | 0,07 | 5505 | 483 | 4493 | 697 | 4318 | 730 | 4335 | 733 |
| MR@25°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)quad | 0,45 | 0,03 | 2852 | 142 | 3328 | 128 | 3491 | 66 | 3540 | 35 | 0,16 | 0,01 | 4150 | 50 | 3141 | 52 | 2956 | 55 | 2960 | 56 |
| MR@25°C (1Hz; 0.10 seg; 25%) | 0,48 | 0,10 | 5648 | 680 | 6580 | 1284 | 6792 | 1452 | 6817 | 1457 | 0,24 | 0,07 | 7102 | 826 | 6103 | 1162 | 5915 | 1207 | 5938 | 1211 |
| MR@10°C (1Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,29 | 0,02 | 10990 | 1796 | 12539 | 1888 | 12772 | 1893 | 12821 | 1901 | 0,15 | 0,02 | 13290 | 2396 | 11826 | 1729 | 11571 | 1636 | 11616 | 1643 |
| MR@10°C (3Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,33 | 0,03 | 9378 | 1552 | 11262 | 2213 | 11587 | 2347 | 11631 | 2355 | 0,18 | 0,01 | 11087 | 1979 | 10658 | 2035 | 10545 | 2034 | 10586 | 2042 |
| MR@10°C (5Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,34 | 0,03 | 12759 | 2313 | 15527 | 2941 | 16017 | 3066 | 16078 | 3077 | 0,18 | 0,02 | 15385 | 2942 | 14588 | 2705 | 14405 | 2666 | 14462 | 2676 |
| MR@10°C (1Hz; 0.15 seg; 11%) | 0,34 | 0,04 | 10111 | 690 | 12296 | 1408 | 12684 | 1570 | 12732 | 1575 | 0,19 | 0,02 | 12026 | 829 | 11607 | 1294 | 11493 | 1356 | 11538 | 1361 |
| MR@10°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)ssv | 0,37 | 0,05 | 11557 | 801 | 14605 | 1759 | 15190 | 2012 | 15247 | 2019 | 0,20 | 0,04 | 13795 | 936 | 13734 | 1619 | 13669 | 1738 | 13723 | 1744 |
| MR@10°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)quad | 0,43 | 0,02 | 11186 | 1305 | 15243 | 2186 | 16114 | 2413 | 16173 | 2421 | 0,26 | 0,02 | 13175 | 1532 | 14328 | 2024 | 14468 | 2109 | 14524 | 2117 |
| MR@10°C (1Hz; 0.10 seg; 8%) | 0,30 | 0,06 | 11845 | 1592 | 13668 | 2963 | 13965 | 3251 | 14018 | 3263 | 0,13 | 0,05 | 14785 | 1716 | 12763 | 2744 | 12446 | 2848 | 12495 | 2859 |
| MR@10°C (1Hz; 0.10 seg; 25%) | 0,29 | 0,05 | 12304 | 399 | 13984 | 1458 | 14241 | 1674 | 14295 | 1680 | 0,14 | 0,04 | 14841 | 387 | 13197 | 1342 | 12914 | 1450 | 12965 | 1455 |

MR f(dh) - poiss=f-temp Módulo de Resiliência calculado em função dos deslocamento horizontais lidos e a partir do coeficiente de poisson arbitrado em função da temperatura
MR f(dv) - poiss=f-temp Módulo de Resiliência calculado em função dos deslocamento verticais lidos e a partir do coeficiente de poisson arbitrado em função da temperatura
MR f(dh) - poiss=calc Módulo de Resiliência calculado em função dos deslocamento horizontais lidos e a partir do coeficiente de poisson calculado p/ cada amostra
MR f(dv) - poiss=calc Módulo de Resiliência calculado em função dos deslocamento verticais lidos e a partir do coeficiente de poisson calculado p/ cada amostra

Ensaio CA-C

| Código | Algoritmo NCHRP 1-28/1-28A s/correção de abaulamento | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|--|------------|-------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
| | v inst | | v tot | | MRI (dh) poiss=f-temp | | MRt (dh) poiss=f-temp | | MRI (dv) poiss=f-temp | | MRt (dv) poiss=f-temp | | MRI (dh) poiss=calc | | MRt (dh) poiss=calc | | MRI (dv) poiss=calc | | MRt (dv) poiss=calc | |
| | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. |
| MR@35°C (1Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,62 | 0,11 | 0,37 | 0,09 | 2028 | 361 | 1417 | 258 | 2438 | 290 | 1322 | 153 | 2548 | 269 | 1299 | 140 | 2557 | 270 | 1304 | 140 |
| MR@35°C (1Hz; 0.10 seg; 35%) | 0,69 | 0,10 | 0,45 | 0,07 | 2189 | 422 | 1382 | 263 | 2798 | 369 | 1414 | 193 | 2977 | 341 | 1416 | 177 | 2988 | 342 | 1421 | 178 |
| MR@35°C (1Hz; 0.15 seg; 11%) | 0,58 | 0,22 | 0,35 | 0,16 | 2489 | 940 | 1545 | 627 | 2846 | 1013 | 1364 | 477 | 2960 | 1121 | 1333 | 478 | 2971 | 1125 | 1338 | 480 |
| MR@35°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)ssv | 0,67 | 0,07 | 0,42 | 0,06 | 2687 | 543 | 1299 | 246 | 3416 | 783 | 1307 | 300 | 3626 | 866 | 1304 | 313 | 3639 | 869 | 1309 | 314 |
| MR@35°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)quad. | 0,54 | 0,06 | 0,30 | 0,04 | 2571 | 742 | 1248 | 346 | 2890 | 744 | 1081 | 298 | 2962 | 739 | 1045 | 289 | 2973 | 742 | 1049 | 290 |
| MR@35°C (1Hz; 0.10 seg; 25%) | 0,56 | 0,09 | 0,36 | 0,07 | 2436 | 94 | 1562 | 48 | 2821 | 244 | 1453 | 130 | 2917 | 307 | 1425 | 152 | 2928 | 308 | 1431 | 153 |
| MR@25°C (1Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,41 | 0,08 | 0,23 | 0,05 | 7254 | 1471 | 5144 | 1063 | 7895 | 2197 | 4401 | 1189 | 8018 | 2383 | 4260 | 1202 | 8048 | 2392 | 4277 | 1206 |
| MR@25°C (1Hz; 0.10 seg; 35%) | 0,43 | 0,04 | 0,28 | 0,06 | 7963 | 1207 | 5134 | 819 | 8866 | 1692 | 4746 | 1129 | 9039 | 1818 | 4658 | 1183 | 9073 | 1824 | 4676 | 1188 |
| MR@25°C (1Hz; 0.15 seg; 11%) | 0,56 | 0,10 | 0,36 | 0,07 | 4813 | 834 | 2835 | 503 | 6050 | 1083 | 2865 | 545 | 6370 | 1211 | 2862 | 568 | 6393 | 1215 | 2872 | 570 |
| MR@25°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)ssv | 0,51 | 0,05 | 0,33 | 0,04 | 7553 | 930 | 3295 | 375 | 9061 | 984 | 3223 | 458 | 9408 | 1008 | 3196 | 475 | 9442 | 1012 | 3208 | 477 |
| MR@25°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)quad | 0,47 | 0,01 | 0,28 | 0,01 | 5013 | 15 | 2441 | 51 | 5856 | 51 | 2244 | 51 | 6032 | 28 | 2130 | 113 | 6056 | 51 | 2166 | 104 |
| MR@25°C (1Hz; 0.10 seg; 25%) | 0,48 | 0,10 | 0,41 | 0,24 | 7776 | 991 | 4784 | 611 | 9077 | 1833 | 5218 | 2094 | 9374 | 2067 | 5365 | 2494 | 9409 | 2074 | 5384 | 2502 |
| MR@10°C (1Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,30 | 0,01 | 0,16 | 0,01 | 13830 | 2385 | 10523 | 1708 | 15829 | 2585 | 9610 | 1380 | 16133 | 2608 | 9436 | 1329 | 16194 | 2618 | 9473 | 1335 |
| MR@10°C (1Hz; 0.15 seg; 11%) | 0,33 | 0,03 | 0,19 | 0,02 | 14140 | 573 | 9401 | 653 | 17012 | 1278 | 9139 | 1019 | 17509 | 1441 | 9059 | 1068 | 17575 | 1446 | 9094 | 1072 |
| MR@10°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)ssv | 0,36 | 0,03 | 0,20 | 0,05 | 19217 | 1876 | 10670 | 775 | 23941 | 3257 | 10600 | 1553 | 24817 | 3577 | 10549 | 1673 | 24910 | 3590 | 10590 | 1679 |
| MR@10°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)quad | 0,41 | 0,03 | 0,26 | 0,01 | 19037 | 2095 | 10251 | 1202 | 25409 | 3512 | 11129 | 1540 | 26734 | 3882 | 11233 | 1597 | 26834 | 3895 | 11277 | 1603 |
| MR@10°C (1Hz; 0.10 seg; 8%) | 0,30 | 0,06 | 0,16 | 0,04 | 13961 | 1915 | 11418 | 1647 | 16145 | 3587 | 10564 | 2167 | 16503 | 3941 | 10398 | 2229 | 16566 | 3955 | 10439 | 2237 |
| MR@10°C (1Hz; 0.10 seg; 25%) | 0,29 | 0,04 | 0,17 | 0,02 | 14924 | 565 | 11764 | 346 | 17030 | 1715 | 11026 | 714 | 17353 | 1951 | 10868 | 761 | 17419 | 1958 | 10911 | 763 |

MRI f(dh) - poiss=f-temp MR Instantâneo calculado em função dos deslocamento horizontais lidos e a partir do coeficiente de poisson arbitrado em função da temperatura
MRt f(dh) - poiss=f-temp MR total calculado em função dos deslocamento horizontais lidos e a partir do coeficiente de poisson arbitrado em função da temperatura
MRI f(dv) - poiss=f-temp MR Instantâneo calculado em função dos deslocamento verticais lidos e a partir do coeficiente de poisson arbitrado em função da temperatura
MRt f(dv) - poiss=f-temp MR total calculado em função dos deslocamento verticais lidos e a partir do coeficiente de poisson arbitrado em função da temperatura
MRI f(dh) - poiss=calc MR Instantâneo calculado em função dos deslocamento horizontais lidos e a partir do coeficiente de poisson calculado p/ cada amostra
MRt f(dh) - poiss=calc MR total calculado em função dos deslocamento horizontais lidos e a partir do coeficiente de poisson calculado p/ cada amostra
MRI f(dv) - poiss=calc MR Instantâneo calculado em função dos deslocamento verticais lidos e a partir do coeficiente de poisson calculado p/ cada amostra
MRt f(dv) - poiss=calc MR total calculado em função dos deslocamento verticais lidos e a partir do coeficiente de poisson calculado p/ cada amostra
v inst Coeficiente de poisson instantâneo - calculado a partir dos deslocamentos resilientes instantâneos
v tot Coeficiente de poisson total - calculado a partir dos deslocamentos resilientes totais

Ensaio CA-C

| Código | Algoritmo NCHRP 1-28/1-28A c/correção de abaulamento | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|---|------------|-------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
| | v inst | | v tot | | MRI (dh) poiss=f-temp | | MRt (dh) poiss=f-temp | | MRI (dv) poiss=f-temp | | MRt (dv) poiss=f-temp | | MRI (dh) poiss=calc | | MRt (dh) poiss=calc | | MRI (dv) poiss=calc | | MRt (dv) poiss=calc | |
| | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. |
| MR@35°C (1Hz; 0.10 seg; 11%) | -0,07 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 5583 | 1684 | 2552 | 640 | 1958 | 220 | 1167 | 131 | 1705 | 175 | 1037 | 109 | 1712 | 175 | 1041 | 110 |
| MR@35°C (1Hz; 0.10 seg; 35%) | 0,11 | 0,08 | 0,16 | 0,07 | 3978 | 1136 | 1926 | 451 | 2392 | 292 | 1302 | 170 | 2191 | 225 | 1209 | 142 | 2200 | 226 | 1214 | 142 |
| MR@35°C (1Hz; 0.15 seg; 11%) | -0,11 | 0,13 | 0,01 | 0,13 | 15051 | 17092 | 2978 | 1813 | 2242 | 755 | 1208 | 411 | 1929 | 665 | 1074 | 370 | 1936 | 668 | 1079 | 372 |
| MR@35°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)ssv | -0,20 | 0,02 | 0,05 | 0,04 | 15503 | 2615 | 2164 | 381 | 2543 | 552 | 1155 | 259 | 2132 | 474 | 1041 | 242 | 2140 | 476 | 1045 | 243 |
| MR@35°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)quad. | -0,25 | 0,05 | -0,02 | 0,04 | 17106 | 9706 | 2270 | 786 | 2173 | 503 | 962 | 252 | 1819 | 440 | 848 | 217 | 1795 | 390 | 851 | 218 |
| MR@35°C (1Hz; 0.10 seg; 25%) | 0,00 | 0,05 | 0,07 | 0,05 | 5179 | 464 | 2363 | 122 | 2375 | 193 | 1324 | 114 | 2109 | 195 | 1201 | 119 | 2118 | 196 | 1205 | 120 |
| MR@25°C (1Hz; 0.10 seg; 11%) | -0,09 | 0,03 | -0,05 | 0,03 | 18197 | 4135 | 8958 | 1956 | 6498 | 1685 | 3931 | 1020 | 5725 | 1510 | 3513 | 928 | 5749 | 1516 | 3527 | 932 |
| MR@25°C (1Hz; 0.10 seg; 35%) | 0,08 | 0,02 | 0,10 | 0,03 | 12405 | 2209 | 6676 | 1176 | 7860 | 1413 | 4440 | 1014 | 7281 | 1316 | 4139 | 978 | 7310 | 1321 | 4155 | 982 |
| MR@25°C (1Hz; 0.15 seg; 11%) | 0,01 | 0,06 | 0,10 | 0,05 | 9783 | 2915 | 4036 | 925 | 5034 | 807 | 2614 | 470 | 4571 | 713 | 2431 | 437 | 4589 | 716 | 2440 | 438 |
| MR@25°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)ssv | -0,09 | 0,08 | 0,10 | 0,05 | 22214 | 7731 | 4555 | 526 | 7303 | 868 | 2970 | 429 | 6438 | 827 | 2764 | 421 | 6464 | 830 | 2775 | 423 |
| MR@25°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)quad | 0,01 | 0,08 | 0,07 | 0,01 | 11653 | 302 | 3367 | 115 | 4836 | 77 | 2060 | 46 | 4242 | 124 | 1941 | 60 | 4345 | 55 | 1941 | 53 |
| MR@25°C (1Hz; 0.10 seg; 25%) | 0,13 | 0,05 | 0,20 | 0,16 | 11527 | 1076 | 5981 | 658 | 8086 | 1603 | 4867 | 1884 | 7597 | 1609 | 4711 | 2039 | 7627 | 1615 | 4729 | 2047 |
| MR@10°C (1Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,09 | 0,03 | 0,04 | 0,02 | 18387 | 3857 | 12960 | 2416 | 14580 | 2251 | 9136 | 1269 | 14054 | 2071 | 8686 | 1161 | 14110 | 2079 | 8721 | 1166 |
| MR@10°C (1Hz; 0.15 seg; 11%) | 0,10 | 0,02 | 0,08 | 0,01 | 18977 | 800 | 11321 | 860 | 15664 | 1116 | 8703 | 939 | 15062 | 1141 | 8355 | 933 | 15122 | 1146 | 8388 | 936 |
| MR@10°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)ssv | 0,06 | 0,00 | 0,08 | 0,03 | 28561 | 3510 | 13033 | 1010 | 21294 | 2674 | 10046 | 1421 | 20369 | 2564 | 9651 | 1442 | 20450 | 2574 | 9690 | 1448 |
| MR@10°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)quad | 0,10 | 0,02 | 0,12 | 0,00 | 28003 | 3857 | 12380 | 1602 | 22482 | 2891 | 10529 | 1409 | 21700 | 2788 | 10236 | 1376 | 21786 | 2799 | 10277 | 1381 |
| MR@10°C (1Hz; 0.10 seg; 8%) | 0,06 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 19553 | 2915 | 14906 | 2321 | 14656 | 3086 | 9907 | 1966 | 14033 | 3057 | 9362 | 1901 | 14089 | 3069 | 9400 | 1909 |
| MR@10°C (1Hz; 0.10 seg; 25%) | 0,10 | 0,02 | 0,05 | 0,01 | 19405 | 789 | 14382 | 427 | 15763 | 1502 | 10482 | 659 | 15237 | 1556 | 10001 | 666 | 15298 | 1562 | 10041 | 669 |
| MRi f(dh) - poiss=f-temp | MR instantâneo calculado em função dos deslocamento horizontais lidos e a partir do coeficiente de poisson arbitrado em função da temperatura | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MRt f(dh) - poiss=f-temp | MR total calculado em função dos deslocamento horizontais lidos e a partir do coeficiente de poisson arbitrado em função da temperatura | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MRi f(dv) - poiss=f-temp | MR instantâneo calculado em função dos deslocamento verticais lidos e a partir do coeficiente de poisson arbitrado em função da temperatura | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MRt f(dv) - poiss=f-temp | MR total calculado em função dos deslocamento verticais lidos e a partir do coeficiente de poisson arbitrado em função da temperatura | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MRi f(dh) - poiss=calc | MR instantâneo calculado em função dos deslocamento horizontais lidos e a partir do coeficiente de poisson calculado p/ cada amostra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MRt f(dh) - poiss=calc | MR total calculado em função dos deslocamento horizontais lidos e a partir do coeficiente de poisson calculado p/ cada amostra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MRi f(dv) - poiss=calc | MR instantâneo calculado em função dos deslocamento verticais lidos e a partir do coeficiente de poisson calculado p/ cada amostra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MRt f(dv) - poiss=calc | MR total calculado em função dos deslocamento verticais lidos e a partir do coeficiente de poisson calculado p/ cada amostra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| v inst | Coeficiente de poisson instantâneo - calculado a partir dos deslocamentos resilientes instantâneos | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| v tot | Coeficiente de poisson total - calculado a partir dos deslocamentos resilientes totais | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Ensaio CA-AB

| Código | Algoritmo LTPP P07 s/ correção abaulamento | | | | | | | | | | Algoritmo LTPP P07 c/correção abaulamento | | | | | | | | | |
|------------------------------------|--|------------|-------------------------|------------|-------------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|---|------------|-------------------------|------------|-------------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|
| | v | | MR f(dh) - poiss=f-temp | | MR f(dv) - poiss=f-temp | | MR f(dh) - poiss=calc | | MR f(dv) - poiss=calc | | v | | MR f(dh) - poiss=f-temp | | MR f(dv) - poiss=f-temp | | MR f(dh) - poiss=calc | | MR f(dv) - poiss=calc | |
| | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. |
| MR@35°C (1Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,43 | 0,15 | 1753 | 265 | 1771 | 314 | 1775 | 350 | 1781 | 351 | 0,09 | 0,13 | 2769 | 526 | 1578 | 285 | 1443 | 293 | 1449 | 294 |
| MR@35°C (1Hz; 0.10 seg; 35%) | 0,61 | 0,12 | 1468 | 169 | 1776 | 292 | 1861 | 351 | 1867 | 352 | 0,28 | 0,09 | 1959 | 262 | 1628 | 260 | 1565 | 278 | 1571 | 279 |
| MR@35°C (3Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,50 | 0,04 | 1729 | 194 | 1899 | 272 | 1934 | 293 | 1941 | 294 | 0,16 | 0,07 | 2461 | 130 | 1702 | 258 | 1587 | 271 | 1593 | 272 |
| MR@35°C (5Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,48 | 0,18 | 1817 | 482 | 1984 | 889 | 2031 | 1011 | 2039 | 1014 | 0,28 | 0,45 | 2466 | 455 | 1859 | 960 | 1860 | 1200 | 1867 | 1204 |
| MR@35°C (1Hz; 0.15 seg; 11%) | 0,51 | 0,17 | 1514 | 129 | 1669 | 412 | 1711 | 501 | 1718 | 502 | 0,16 | 0,19 | 2267 | 232 | 1497 | 391 | 1403 | 447 | 1409 | 449 |
| MR@35°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)ssv | 0,51 | 0,10 | 2102 | 212 | 2338 | 458 | 2394 | 533 | 2402 | 534 | 0,30 | 0,29 | 2638 | 353 | 2160 | 523 | 2111 | 681 | 2119 | 683 |
| MR@35°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)quad. | 0,52 | 0,02 | 1514 | 70 | 1667 | 106 | 1721 | 109 | 1737 | 110 | 0,14 | 0,02 | 2272 | 58 | 1500 | 130 | 1387 | 132 | 1392 | 133 |
| MR@35°C (1Hz; 0.10 seg; 25%) | 0,49 | 0,05 | 2194 | 269 | 2367 | 197 | 2401 | 179 | 2410 | 180 | 0,17 | 0,03 | 3075 | 386 | 2150 | 182 | 2004 | 161 | 2012 | 161 |
| MR@25°C (1Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,38 | 0,12 | 3557 | 149 | 3689 | 618 | 3714 | 719 | 3728 | 722 | 0,07 | 0,07 | 5357 | 249 | 3316 | 530 | 3071 | 543 | 3083 | 545 |
| MR@25°C (1Hz; 0.10 seg; 35%) | 0,41 | 0,11 | 3509 | 358 | 3789 | 762 | 3846 | 866 | 3860 | 868 | 0,23 | 0,08 | 4238 | 465 | 3576 | 693 | 3457 | 727 | 3471 | 729 |
| MR@25°C (3Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,39 | 0,06 | 4145 | 1514 | 4280 | 1217 | 4293 | 1148 | 4310 | 1152 | 0,07 | 0,07 | 6481 | 3012 | 3823 | 1038 | 3522 | 882 | 3536 | 885 |
| MR@25°C (5Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,47 | 0,04 | 5093 | 323 | 5861 | 283 | 6022 | 297 | 6044 | 298 | 0,12 | 0,03 | 7565 | 581 | 5199 | 255 | 4867 | 249 | 4887 | 250 |
| MR@25°C (1Hz; 0.15 seg; 11%) | 0,42 | 0,10 | 4190 | 453 | 4599 | 916 | 4682 | 1048 | 4699 | 1051 | 0,09 | 0,07 | 6360 | 670 | 4096 | 794 | 3810 | 805 | 3825 | 808 |
| MR@25°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)ssv | 0,51 | 0,08 | 4376 | 459 | 5259 | 579 | 5468 | 653 | 5488 | 656 | 0,15 | 0,07 | 6378 | 811 | 4674 | 512 | 4420 | 521 | 4438 | 523 |
| MR@25°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)quad | 0,33 | 0,37 | 3283 | 352 | 3196 | 1885 | 3285 | 2077 | 3297 | 2084 | 0,06 | 0,21 | 4845 | 297 | 2879 | 1646 | 2712 | 1627 | 2722 | 1633 |
| MR@25°C (1Hz; 0.10 seg; 25%) | 0,36 | 0,07 | 4086 | 637 | 4159 | 687 | 4161 | 717 | 4176 | 719 | 0,16 | 0,06 | 5279 | 954 | 3875 | 614 | 3663 | 586 | 3677 | 588 |
| MR@10°C (1Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,40 | 0,03 | 10942 | 1890 | 13072 | 24 | 13742 | 130 | 13762 | 107 | 0,24 | 0,03 | 14698 | 5090 | 12272 | 19 | 12230 | 151 | 12352 | 111 |
| MR@10°C (3Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,34 | 0,12 | 9601 | 1384 | 11573 | 1789 | 11959 | 2035 | 12004 | 2042 | 0,18 | 0,10 | 11597 | 1899 | 10889 | 1640 | 10776 | 1752 | 10818 | 1758 |
| MR@10°C (5Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,50 | 0,02 | 9773 | 1272 | 14226 | 1901 | 15280 | 2061 | 15336 | 2069 | 0,31 | 0,02 | 11450 | 1536 | 13343 | 1753 | 13646 | 1792 | 13699 | 1799 |
| MR@10°C (1Hz; 0.15 seg; 11%) | 0,27 | 0,01 | 10852 | 1647 | 11908 | 1637 | 12042 | 1625 | 12089 | 1631 | 0,11 | 0,02 | 13442 | 2269 | 11185 | 1495 | 10845 | 1401 | 10888 | 1407 |
| MR@10°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)ssv | 0,44 | 0,05 | 14902 | 2575 | 20225 | 2659 | 21369 | 2636 | 21448 | 2646 | 0,26 | 0,04 | 17446 | 3023 | 19001 | 2538 | 19200 | 2470 | 19274 | 2480 |
| MR@10°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)quad | 0,45 | 0,04 | 10892 | 1622 | 15098 | 2870 | 16028 | 3207 | 16087 | 3218 | 0,27 | 0,03 | 12868 | 1833 | 14157 | 2675 | 14329 | 2833 | 14384 | 2843 |
| MR@10°C (1Hz; 0.10 seg; 8%) | 0,33 | 0,03 | 11831 | 2320 | 14245 | 3172 | 14664 | 3352 | 14720 | 3364 | 0,14 | 0,03 | 14968 | 2687 | 13205 | 2962 | 12909 | 2990 | 12960 | 3002 |
| MR@10°C (1Hz; 0.10 seg; 25%) | 0,33 | 0,04 | 9980 | 482 | 11953 | 924 | 12295 | 1062 | 12342 | 1066 | 0,19 | 0,03 | 11716 | 644 | 11339 | 847 | 11235 | 913 | 11279 | 916 |
| MR f(dh) - poiss=f-temp | Módulo de Resiliência calculado em função dos deslocamento horizontais lidos e a partir do coeficiente de poisson arbitrado em função da temperatura | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MR f(dv) - poiss=f-temp | Módulo de Resiliência calculado em função dos deslocamento verticais lidos e a partir do coeficiente de poisson arbitrado em função da temperatura | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MR f(dh) - poiss=calc | Módulo de Resiliência calculado em função dos deslocamento horizontais lidos e a partir do coeficiente de poisson calculado p/ cada amostra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MR f(dv) - poiss=calc | Módulo de Resiliência calculado em função dos deslocamento verticais lidos e a partir do coeficiente de poisson calculado p/ cada amostra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Ensaios CA-AB

| Código | Algoritmo NCHRP 1-28/1-28A s/correção de abaulamento | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|---|------------|-------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
| | v inst | | v tot | | MRI (dh) poiss=f-temp | | MRt (dh) poiss=f-temp | | MRI (dv) poiss=f-temp | | MRt (dv) poiss=f-temp | | MRI (dh) poiss=calc | | MRt (dh) poiss=calc | | MRI (dv) poiss=calc | | MRt (dv) poiss=calc | |
| | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. |
| MR@35°C (1Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,43 | 0,14 | 0,25 | 0,11 | 2290 | 331 | 1588 | 268 | 2316 | 392 | 1265 | 229 | 2321 | 439 | 1208 | 237 | 2330 | 440 | 1213 | 238 |
| MR@35°C (1Hz; 0.10 seg; 35%) | 0,69 | 0,14 | 0,48 | 0,13 | 1913 | 478 | 1156 | 323 | 2431 | 466 | 1201 | 245 | 2587 | 476 | 1211 | 235 | 2596 | 478 | 1216 | 236 |
| MR@35°C (1Hz; 0.15 seg; 11%) | 0,50 | 0,16 | 0,33 | 0,16 | 2202 | 184 | 1298 | 104 | 2407 | 588 | 1175 | 333 | 2462 | 711 | 1153 | 378 | 2471 | 714 | 1157 | 380 |
| MR@35°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)ssv | 0,52 | 0,11 | 0,25 | 0,26 | 3672 | 556 | 1835 | 168 | 4110 | 977 | 1475 | 719 | 4215 | 1114 | 1435 | 774 | 4230 | 1118 | 1441 | 777 |
| MR@35°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)quad. | 0,51 | 0,01 | 0,32 | 0,01 | 2517 | 200 | 1267 | 97 | 2775 | 252 | 1131 | 69 | 2828 | 265 | 1099 | 64 | 2838 | 266 | 1103 | 64 |
| MR@35°C (1Hz; 0.10 seg; 25%) | 0,49 | 0,05 | 0,29 | 0,04 | 2971 | 404 | 1917 | 266 | 3193 | 315 | 1630 | 138 | 3235 | 293 | 1570 | 119 | 3247 | 294 | 1576 | 119 |
| MR@25°C (1Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,38 | 0,12 | 0,22 | 0,10 | 4572 | 209 | 3139 | 135 | 4742 | 805 | 2617 | 456 | 4773 | 933 | 2528 | 497 | 4790 | 936 | 2538 | 499 |
| MR@25°C (1Hz; 0.10 seg; 35%) | 0,44 | 0,13 | 0,24 | 0,09 | 4673 | 642 | 3015 | 326 | 5179 | 1054 | 2611 | 570 | 5290 | 1187 | 2536 | 604 | 5310 | 1191 | 2546 | 606 |
| MR@25°C (1Hz; 0.15 seg; 11%) | 0,42 | 0,10 | 0,27 | 0,11 | 5932 | 532 | 3610 | 452 | 6527 | 1148 | 3272 | 867 | 6648 | 1330 | 3207 | 945 | 6673 | 1334 | 3219 | 948 |
| MR@25°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)ssv | 0,50 | 0,07 | 0,32 | 0,06 | 8271 | 1259 | 3751 | 415 | 9835 | 1575 | 3616 | 392 | 10193 | 1686 | 3576 | 405 | 10230 | 1692 | 3590 | 407 |
| MR@25°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)quad | 0,59 | 0,11 | 0,38 | 0,09 | 5507 | 550 | 2706 | 319 | 7087 | 350 | 2796 | 141 | 7511 | 432 | 2809 | 160 | 7538 | 433 | 2820 | 161 |
| MR@25°C (1Hz; 0.10 seg; 25%) | 0,37 | 0,06 | 0,19 | 0,05 | 5541 | 795 | 3613 | 548 | 5653 | 870 | 2858 | 485 | 5657 | 911 | 2731 | 483 | 5678 | 914 | 2742 | 485 |
| MR@10°C (1Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,40 | 0,06 | 0,24 | 0,03 | 14025 | 2413 | 10454 | 1866 | 16484 | 807 | 9935 | 123 | 14803 | 4332 | 9117 | 1500 | 17328 | 1110 | 10021 | 40 |
| MR@10°C (1Hz; 0.15 seg; 11%) | 0,27 | 0,02 | 0,13 | 0,01 | 14840 | 2186 | 10222 | 1589 | 16275 | 1998 | 8880 | 1246 | 16458 | 1952 | 8659 | 1198 | 16522 | 1960 | 8693 | 1202 |
| MR@10°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)ssv | 0,47 | 0,05 | 0,25 | 0,04 | 25704 | 4243 | 13959 | 2277 | 36431 | 6067 | 14864 | 1729 | 38891 | 6617 | 14962 | 1647 | 39035 | 6641 | 15019 | 1653 |
| MR@10°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)quad | 0,45 | 0,03 | 0,26 | 0,03 | 17719 | 2914 | 10067 | 1599 | 24532 | 4889 | 10993 | 2186 | 26032 | 5403 | 11110 | 2292 | 26129 | 5422 | 11153 | 2300 |
| MR@10°C (1Hz; 0.10 seg; 8%) | 0,33 | 0,02 | 0,18 | 0,02 | 13391 | 1924 | 11440 | 2359 | 16131 | 2624 | 10868 | 2409 | 16605 | 2766 | 10735 | 2407 | 16668 | 2776 | 10777 | 2417 |
| MR@10°C (1Hz; 0.10 seg; 25%) | 0,33 | 0,04 | 0,18 | 0,03 | 12959 | 837 | 9491 | 501 | 15469 | 973 | 8972 | 709 | 15899 | 1063 | 8858 | 762 | 15959 | 1067 | 8893 | 765 |
| MRI f(dh) - poiss=f-temp | MR instantâneo calculado em função dos deslocamento horizontais lidos e a partir do coeficiente de poisson arbitrado em função da temperatura | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MRt f(dh) - poiss=f-temp | MR total calculado em função dos deslocamento horizontais lidos e a partir do coeficiente de poisson arbitrado em função da temperatura | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MRI f(dv) - poiss=f-temp | MR instantâneo calculado em função dos deslocamento verticais lidos e a partir do coeficiente de poisson arbitrado em função da temperatura | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MRt f(dv) - poiss=f-temp | MR total calculado em função dos deslocamento verticais lidos e a partir do coeficiente de poisson arbitrado em função da temperatura | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MRI f(dh) - poiss=calc | MR instantâneo calculado em função dos deslocamento horizontais lidos e a partir do coeficiente de poisson calculado p/ cada amostra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MRt f(dh) - poiss=calc | MR total calculado em função dos deslocamento horizontais lidos e a partir do coeficiente de poisson calculado p/ cada amostra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MRI f(dv) - poiss=calc | MR instantâneo calculado em função dos deslocamento verticais lidos e a partir do coeficiente de poisson calculado p/ cada amostra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MRt f(dv) - poiss=calc | MR total calculado em função dos deslocamento verticais lidos e a partir do coeficiente de poisson calculado p/ cada amostra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| v inst | Coeficiente de poisson instantâneo - calculado a partir dos deslocamentos resilientes instantâneos | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| v tot | Coeficiente de poisson total - calculado a partir dos deslocamentos resilientes totais | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Ensaios CA-AB

| Código | Algoritmo NCHRP 1-28/1-28A c/correção de abaulamento | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|---|------------|-------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
| | v inst | | v tot | | MRI (dh) poiss=f-temp | | MRt (dh) poiss=f-temp | | MRI (dv) poiss=f-temp | | MRt (dv) poiss=f-temp | | MRI (dh) poiss=calc | | MRt (dh) poiss=calc | | MRI (dv) poiss=calc | | MRt (dv) poiss=calc | |
| | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. | Méd. | Desv. Pad. |
| MR@35°C (1Hz; 0.10 seg; 11%) | -0,13 | 0,08 | -0,06 | 0,08 | 7710 | 2472 | 3069 | 776 | 1897 | 301 | 1129 | 196 | 1624 | 273 | 987 | 180 | 1630 | 274 | 991 | 181 |
| MR@35°C (1Hz; 0.10 seg; 35%) | 0,16 | 0,13 | 0,22 | 0,13 | 3271 | 1181 | 1543 | 521 | 2114 | 373 | 1118 | 218 | 1961 | 307 | 1053 | 188 | 1969 | 309 | 1057 | 189 |
| MR@35°C (1Hz; 0.15 seg; 11%) | -0,13 | 0,08 | 0,01 | 0,10 | 7471 | 1616 | 2199 | 130 | 1945 | 449 | 1052 | 286 | 1671 | 429 | 943 | 285 | 1677 | 431 | 947 | 286 |
| MR@35°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)ssv | -0,24 | 0,19 | -0,03 | 0,20 | 3036 | 14745 | 3732 | 1143 | 3111 | 875 | 1323 | 636 | 2606 | 884 | 1185 | 625 | 2614 | 887 | 1190 | 628 |
| MR@35°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)quad. | -0,21 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 14357 | 3354 | 2163 | 213 | 2159 | 171 | 1013 | 59 | 1805 | 135 | 900 | 49 | 1811 | 135 | 904 | 49 |
| MR@35°C (1Hz; 0.10 seg; 25%) | -0,06 | 0,04 | 0,02 | 0,04 | 7118 | 1731 | 3067 | 573 | 2683 | 245 | 1485 | 121 | 2344 | 191 | 1325 | 96 | 2354 | 192 | 1331 | 97 |
| MR@25°C (1Hz; 0.10 seg; 11%) | -0,04 | 0,04 | 0,00 | 0,06 | 9104 | 573 | 4770 | 267 | 4068 | 626 | 2398 | 395 | 3644 | 598 | 2171 | 387 | 3659 | 601 | 2180 | 388 |
| MR@25°C (1Hz; 0.10 seg; 35%) | 0,17 | 0,08 | 0,12 | 0,06 | 6271 | 1074 | 3603 | 436 | 4753 | 905 | 2498 | 527 | 4520 | 900 | 2343 | 525 | 4537 | 904 | 2353 | 527 |
| MR@25°C (1Hz; 0.15 seg; 11%) | -0,09 | 0,04 | 0,01 | 0,05 | 14739 | 2265 | 5657 | 807 | 5393 | 880 | 2956 | 737 | 4762 | 827 | 2686 | 709 | 4782 | 830 | 2697 | 712 |
| MR@25°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)ssv | -0,19 | 0,05 | 0,03 | 0,04 | 24027 | 17351 | 5870 | 871 | 7533 | 999 | 3252 | 331 | 6438 | 780 | 2970 | 303 | 6463 | 782 | 2982 | 304 |
| MR@25°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)quad | -0,05 | 0,06 | 0,11 | 0,08 | 13632 | 3097 | 3822 | 618 | 5708 | 243 | 2553 | 121 | 5095 | 223 | 2386 | 121 | 5115 | 224 | 2395 | 121 |
| MR@25°C (1Hz; 0.10 seg; 25%) | 0,06 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 8506 | 1643 | 4675 | 847 | 5083 | 724 | 2704 | 440 | 4681 | 655 | 2481 | 407 | 4700 | 658 | 2491 | 409 |
| MR@10°C (1Hz; 0.10 seg; 11%) | 0,15 | 0,04 | 0,10 | 0,03 | 21683 | 8509 | 14106 | 4519 | 15016 | 664 | 9382 | 112 | 14707 | 793 | 9073 | 37 | 14765 | 796 | 9109 | 37 |
| MR@10°C (1Hz; 0.15 seg; 11%) | 0,04 | 0,03 | 0,01 | 0,02 | 21336 | 4041 | 12937 | 2368 | 14787 | 1717 | 8417 | 1141 | 14037 | 1526 | 7937 | 1039 | 14093 | 1533 | 7969 | 1044 |
| MR@10°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)ssv | 0,06 | 0,04 | 0,09 | 0,04 | 42708 | 9070 | 17811 | 3311 | 31024 | 4757 | 13881 | 1581 | 29609 | 4381 | 13357 | 1428 | 29727 | 4399 | 13411 | 1434 |
| MR@10°C (1Hz; 0.20 seg; 11%)quad | 0,10 | 0,01 | 0,11 | 0,01 | 26395 | 5142 | 12376 | 2129 | 21536 | 4021 | 10348 | 1995 | 20825 | 3867 | 10039 | 1966 | 20908 | 3882 | 10078 | 1973 |
| MR@10°C (1Hz; 0.10 seg; 8%) | 0,06 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 19465 | 2791 | 15623 | 3571 | 14468 | 2307 | 10084 | 2170 | 13835 | 2232 | 9501 | 2034 | 13890 | 2241 | 9539 | 2042 |
| MR@10°C (1Hz; 0.10 seg; 25%) | 0,13 | 0,03 | 0,07 | 0,03 | 16479 | 1364 | 11248 | 698 | 14362 | 846 | 8588 | 654 | 14014 | 842 | 8240 | 667 | 14070 | 845 | 8273 | 670 |
| MRI f(dh) - poiss=f-temp | MR instantâneo calculado em função dos deslocamento horizontais lidos e a partir do coeficiente de poisson arbitrado em função da temperatura | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MRt f(dh) - poiss=f-temp | MR total calculado em função dos deslocamento horizontais lidos e a partir do coeficiente de poisson arbitrado em função da temperatura | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MRI f(dv) - poiss=f-temp | MR instantâneo calculado em função dos deslocamento verticais lidos e a partir do coeficiente de poisson arbitrado em função da temperatura | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MRt f(dv) - poiss=f-temp | MR total calculado em função dos deslocamento verticais lidos e a partir do coeficiente de poisson arbitrado em função da temperatura | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MRI f(dh) - poiss=calc | MR instantâneo calculado em função dos deslocamento horizontais lidos e a partir do coeficiente de poisson calculado p/ cada amostra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MRt f(dh) - poiss=calc | MR total calculado em função dos deslocamento horizontais lidos e a partir do coeficiente de poisson calculado p/ cada amostra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MRI f(dv) - poiss=calc | MR instantâneo calculado em função dos deslocamento verticais lidos e a partir do coeficiente de poisson calculado p/ cada amostra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MRt f(dv) - poiss=calc | MR total calculado em função dos deslocamento verticais lidos e a partir do coeficiente de poisson calculado p/ cada amostra | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| v inst | Coeficiente de poisson instantâneo - calculado a partir dos deslocamentos resilientes instantâneos | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| v tot | Coeficiente de poisson total - calculado a partir dos deslocamentos resilientes totais | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |