

**RODRIGO MARQUES MONTANARI**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS  
BETUMINOSAS A FRIO E A QUENTE PARA FINS DE  
PAVIMENTAÇÃO DE VIAS**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, para obtenção  
do título de *Magister Scientiae*.

**VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2007**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

M764e  
2007

Montanari, Rodrigo Marques, 1977-

Estudo do comportamento mecânico de misturas  
betuminosas a frio e a quente para fins de pavimentação  
de vias / Rodrigo Marques Montanari. – Viçosa, MG, 2007.  
xvii, 97f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Carlos Alexandre Braz de Carvalho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 91-97.

1. Pavimentação de betume. 2. Pavimentação de asfalto.
3. Deformações e tensões. 4. Deformações (Mecânica).
5. Pavimentos flexíveis. I. Universidade Federal de Viçosa.  
II. Título.

CDD 22.ed. 625.85

**RODRIGO MARQUES MONTANARI**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS  
BETUMINOSAS A FRIO E A QUENTE PARA FINS DE  
PAVIMENTAÇÃO DE VIAS**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, para obtenção  
do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 16 de agosto de 2007.

---

Prof. Claudio Henrique de C. e Silva  
(Co-Orientador)

---

Prof. Dario Cardoso de Lima  
(Co-Orientador)

---

Prof. Geraldo Luciano de O. Marques

---

Prof. Reginaldo Carneiro da Silva

---

Prof. Carlos Alexandre Braz de Carvalho  
(Orientador)

“Não é o desafio com que nos deparamos que determina quem somos e o que estamos nos tornando, mas a maneira com que respondemos ao desafio. Somos combatentes, idealistas, mas plenamente conscientes. Porque o ter consciência não nos obriga a ter teoria sobre as coisas, só nos obriga a sermos conscientes. Problemas para vencer, liberdade para provar. E, enquanto acreditarmos no nosso sonho, nada é por acaso.”

(Henfil)

### ***OFEREÇO E DEDICO***

Aos meus pais, Maria José e Sebastião.

E ao meu irmão, Ricardo.

Estes nunca poupam esforços e sacrifícios para tornar possíveis os meus sonhos e ideais. Sem vocês, eu nada seria!

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pelo dom da vida e pela luz que guia meu caminho, rendo minha gratidão por mais esta vitória concedida.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, pela oportunidade de realização do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos por um determinado período.

Ao Professor Carlos Alexandre Braz de Carvalho, pela orientação, dedicação, paciência, incentivo e compreensão durante este período, que com seu brilhantismo proporcionou-me momentos únicos de profissionalismo e amizade.

Aos Professores Dario Cardoso de Lima e Cláudio Henrique de Carvalho e Silva, pelo aconselhamento e oportunidades oferecidos neste período.

Aos demais Professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFV, pela dedicação e conhecimentos transmitidos nas aulas ministradas.

Aos Professores Geraldo Luciano de Oliveira Marques e Reginaldo Carneiro da Silva pela participação na banca examinadora.

Ao engenheiro doutorando Danilo de Sá Viana Rezende, pela extraordinária demonstração de boa vontade sendo uma ajuda imprescindível em várias etapas desta pesquisa.

Aos acadêmicos, Rodrigo Antônio de Almeida e Iviane Cunha e Santos, pela dedicação e auxílio dispensados na execução dos ensaios desta pesquisa.

Aos funcionários do Laboratório de Engenharia Civil – UFV, em especial, ao Julinho, Tarcisio, Zé Carlos e Paulo, pela colaboração e ajuda nos ensaios realizados.

A todos os colegas, em especial, André, Betânia, Edgar, Edgar Neto, Eric, Fernando, Flávio, Gersonito, Gisele, Juliano, Leandro, Luís Otávio, Marcelo, Marcos, Rodrigo, Rogério, Taciano, Vanusca, Walcyr, pelo coleguismo, experiência compartilhada, dicas e ajuda nas disciplinas e laboratório.

A Ipiranga Asfalto S. A., representada pelo seu Coordenador de Negócios da unidade de Betim-MG, Engenheiro Edson José Guimarães, pelo fornecimento gratuito dos ligantes betuminosos empregados nesta pesquisa.

Aos meus pais e irmão, pelo apoio constante compartilhando momentos de alegria e dando forças nos momentos difíceis. Espero poder retribuir um dia tudo de bom que vocês me proporcionam.

Aos meus avós, Arnóbio e Glorinha, Geraldo e Maria, pela confiança que sempre depositam em mim e o convívio que me traz benefícios duradouros. Embora dois tenham se transferido para um plano superior, sei que vibram de alegria com minhas conquistas e continuam guiando meus passos.

Aos eternos amigos, Álvaro, André, Angelo, Alexandre, Diogo, Fábio, Ivan, Léo, Luciano, Lucas, Nupercy, Rafael e aqueles que por total descuido não tenha citado, me auxiliaram com idéias, comentários, manifestações de estímulo e pelos impagáveis momentos de descontração e convívio colaborando com o simples fato de existirem em minha vida. De que vale a vida sem vocês!

MUITO OBRIGADO!

## **BIOGRAFIA**

RODRIGO MARQUES MONTANARI, filho de Maria José Marques Montanari e Sebastião Montanari, nasceu aos 29 dias do mês de dezembro, do ano de 1977, na cidade de Tocantins, Minas Gerais.

Em outubro de 2002, graduou-se Engenheiro Civil, pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), em Juiz de Fora, Minas Gerais.

Em novembro de 2003, se especializou em Engenharia de Segurança do Trabalho, pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), em Juiz de Fora, Minas Gerais.

Em março de 2005, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Civil, com área de concentração em Geotecnia, na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, Minas Gerais, defendendo dissertação em agosto de 2007.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>xv</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xvi</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xvii</b>
<b>1 – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 – Natureza do Problema.....	1
1.2 – Relevância do Trabalho.....	2
1.3 – Objetivos.....	4
1.4 – Organização do Trabalho.....	4
<b>2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
2.1 – Misturas Betuminosas.....	6
2.1.1 – Tipos de Revestimentos Asfálticos.....	8
2.2 – Agregados.....	12
2.2.1 – Classificação dos Agregados.....	13
2.2.2 – Características Tecnológicas.....	13



2.3 – Materiais Betuminosos .....	16
2.3.1 – Asfaltos para Pavimentação .....	17
2.4 – Comportamento Mecânico .....	20
2.4.1 – Ensaios Utilizados em Misturas Betuminosas .....	22
<b>3 – MATERIAIS E MÉTODO.....</b>	<b>42</b>
3.1 – Materiais .....	42
3.1.1 – Agregados .....	42
3.1.2 – Materiais Betuminosos .....	45
3.2 – Método.....	47
<b>4 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>54</b>
4.1 – Composição de uma faixa granulométrica .....	54
4.2 – Escolha do teor de projeto de ligante pelo método Marshall.....	57
4.3 – Método Marshall .....	66
4.4 – Resistência à tração por compressão diametral .....	76
4.5 – Deformação Permanente .....	82
4.6 – Resistência à água (adesividade) .....	85
<b>5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>87</b>
5.1 – Conclusões.....	87
5.2 – Recomendações.....	89
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>91</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura – 2.1	Distribuição típica de tensão sob uma roda com carga P (Fonte: Haas e Hudson, 1978).....	7
Figura – 2.2	Amostra de agregado com suas parcelas de volume e peso (Fonte: Souza, 1980) .....	15
Figura – 2.3	Ensaio de compressão diametral (Fonte: DNER - ME 138/94).....	27
Figura – 2.4	Esquema de equipamento para ensaio de compressão diametral de carga repetida (Fonte: DNER - ME 133/94).....	29
Figura – 2.5	Tipos de deformações e formas de carregamento “versus” tempo para ensaio de tração indireta de cargas repetidas (ASTM designation: D 4123-82 (reapproved 1995)).....	31
Figura – 2.6	Painel de controle de pressão confinante na câmara triaxial.....	34
Figura – 2.7	Vista do equipamento triaxial de cargas repetidas do Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil – UFV. ....	35
Figura – 2.8	Câmara triaxial e sistema de aplicação de cargas .....	35

Figura – 2.9	Distribuição das tensões de tração e compressão nos planos diametrais (FONTE: MEDINA e MOTTA (2005)) .....	40
Figura – 2.10	Variação das tensões ( $\Delta\sigma$ ) de compressão ( $\sigma_c$ ) e de tração ( $\sigma_t$ ) no centro do corpo-de-prova (PINTO e PREUSSLER, 2001).....	40
Figura – 3.1	Curvas granulométricas dos agregados .....	44
Figura – 3.2	Vista geral do equipamento triaxial de cargas repetidas do Laboratório de Geotecnia – Departamento de Engenharia Civil - UFV.....	51
Figura – 4.1	Limites inferiores e superiores das faixas granulométricas: faixa C (PMF), faixa B (CA) e faixa de projeto. ....	55
Figura – 4.2	Limites inferior e superior da faixa de projeto e a curva de trabalho da mistura dos agregados. ....	56
Figura – 4.3a	Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas em função do teor de emulsão RL-1C (primeira etapa). ....	59
Figura – 4.3b	Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas em função do teor de emulsão RL-1C (segunda etapa). ....	60
Figura – 4.4	Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas em função do teor de emulsão RM-1C. ....	62
Figura – 4.5	Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas em função do teor de CAP 50-70.....	63
Figura – 4.6	Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas em função do teor de emulsão RL-1C para 50 golpes. ....	67
Figura – 4.7	Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas em função do teor de emulsão RL-1C para 75 golpes. ....	69
Figura – 4.8	Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas em função do teor de emulsão RM-1C para 50 golpes. ....	71

Figura – 4.9	Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas em função do teor de emulsão RM-1C para 75 golpes. ....	73
Figura – 4.10	Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas em função do teor de CAP para 75 golpes. ....	75
Figura – 4.11	Variação da resistência à tração, à temperatura de 30°C, em função do teor de emulsão RL – 1C, empregando 50 golpes. ....	77
Figura – 4.12	Variação da resistência à tração, à temperatura de 30°C, em função do teor de emulsão RL – 1C, empregando 75 golpes. ....	78
Figura – 4.13	Variação da resistência à tração, à temperatura de 30°C, em função do teor de emulsão RM – 1C, empregando 50 golpes. ....	79
Figura – 4.14	Variação da resistência à tração, à temperatura de 30°C, em função do teor de emulsão RM – 1C, empregando 75 golpes. ....	80
Figura – 4.15	Variação da resistência à tração, à temperatura de 30°C, em função do teor de CAP, empregando 75 golpes. ....	81
Figura – 4.16	Evolução das deformações permanentes em função do número de aplicações da tensão desviadora axial cíclica para misturas com emulsão do tipo RL – 1C, com Grau de Compactação de 98%, à temperatura de 27°C. ....	84
Figura – 4.17	Evolução das deformações permanentes em função do número de aplicações da tensão desviadora axial cíclica para misturas com emulsão do tipo RM – 1C, com Grau de Compactação de 99%, à temperatura de 27°C. ....	84
Figura – 4.18	Evolução das deformações permanentes em função do número de aplicações da tensão desviadora axial cíclica para misturas com CAP 50-70, com Grau de Compactação de 95%, à temperatura de 27°C. ....	85

Figura – 4.19 Envolvimento dos agregados pelos ligantes betuminosos após 72 horas recobertos por água destilada em estufa à 40°C .....	86
--	----

## LISTA DE QUADROS

Quadro – 2.1	Tipos de revestimentos asfálticos empregados em pavimentos de rodovias. (Adaptado de SANTANA (1993)).....	8
Quadro – 2.2	Classificação dos agregados. (MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - DNIT (2006)) .....	13
Quadro – 2.3	Fatores e variáveis para estudo do comportamento mecânico das misturas asfálticas. (Adaptado de SANTOS (2002)) .....	21
Quadro – 2.4	Informações sobre características mecânicas e de fadiga à tensão controlada de misturas asfálticas. (PINTO e PRESSLER (2001)) .....	41
Quadro – 3.1	Caracterização dos agregados: abrasão “Los Angeles”, índice de forma, massa específica e material pulverulento. (CARVALHO et al. (2002)).....	43
Quadro – 3.2	Granulometria dos agregados. (CARVALHO et al. (2002)) .....	44
Quadro – 3.3	Especificação das emulsões asfálticas RL-1C e RM-1C. (Ipiranga Asfaltos S. A. (2005)).....	46
Quadro – 3.4	Especificação do CAP 50-70. (Ipiranga Asfaltos S. A. (2005)) .....	47

Quadro – 3.5 Traços das misturas betuminosas utilizadas no método Marshall .....	49
Quadro – 4.1 Limites inferiores (LI) e superiores (LS) das faixas granulométricas: faixa C (PMF), faixa B (CA) e faixa de projeto.....	55
Quadro – 4.2 Projeto da mistura dos agregados para atender à faixa de projeto.....	56
Quadro – 4.3 Parâmetros de dosagem Marshall de misturas asfálticas com emulsão asfáltica do tipo RL – 1C. ....	58
Quadro – 4.4 Parâmetros de dosagem Marshall de misturas asfálticas com emulsão asfáltica do tipo RM – 1C. ....	61
Quadro – 4.5 Parâmetros de dosagem Marshall de misturas asfálticas com CAP 50-70.....	63
Quadro – 4.6 Teores de projeto para as misturas com emulsões dos tipos RL – 1C E RM – 1C.....	65
Quadro – 4.7 Teor de projeto para mistura com CAP 50-70 .....	66
Quadro – 4.8 Parâmetros de dosagem Marshall das misturas no teor de projeto e proximidades com emulsão RL-1C, empregando-se 50 golpes.....	66
Quadro – 4.9 Parâmetros de dosagem Marshall das misturas no teor de projeto e proximidades com emulsão RL-1C empregando 75 golpes. ....	68
Quadro – 4.10 Parâmetros de dosagem Marshall das misturas no teor de projeto e proximidades com emulsão RM-1C empregando 50 golpes. ....	70
Quadro – 4.11 Parâmetros de dosagem Marshall das misturas no teor de projeto e proximidades com emulsão RM-1C empregando 75 golpes. ....	72
Quadro – 4.12 Parâmetros de dosagem Marshall das misturas no teor de projeto e proximidades com CAP 50-70 empregando 75 golpes. ....	74

Quadro – 4.13 Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral, à temperatura de 30°C, em misturas com RL – 1C, empregando 50 golpes.....	76
Quadro – 4.14 Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral, à temperatura de 30°C, em misturas com RL – 1C, empregando 75 golpes.....	77
Quadro – 4.15 Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral, à temperatura de 30°C, em misturas com RM – 1C, empregando 50 golpes.....	79
Quadro – 4.16 Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral, à temperatura de 30°C, em misturas com RM – 1C, empregando 75 golpes.....	80
Quadro – 4.17 Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral, à temperatura de 30°C, em misturas com CAP 50-70, empregando 75 golpes. ....	81
Quadro – 4.18 Deformação permanente para misturas betuminosas com emulsões asfálticas RL – 1C e RM – 1C e misturas com CAP 50-70, para tensão desviadora de 210 kPa e pressão confinante de 175 kPa. Temperatura média do ensaio em relação à câmara triaxial: externa 27 °C e interna 26 °C. ....	83



## LISTA DE SÍMBOLOS

AASHO	<i>American Association of State Highway Officials</i>
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transducer</i>
$M_R$	Módulo de Resiliência
PIB	Produto Interno Bruto
PMF	Pré-misturado a Frio
PMQ	Pré-misturado a Quente
RBV	Relação Betume Vazios
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
UFV	Universidade Federal de Viçosa
VAM	Vazios no Agregado Mineral
Vv	Volume de Vazios

## RESUMO

MONTANARI, Rodrigo Marques, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2007. **Estudo do comportamento mecânico de misturas betuminosas a frio e a quente para fins de pavimentação de vias.** Orientador: Carlos Alexandre Braz de Carvalho. Co-orientadores: Dario Cardoso de Lima e Cláudio Henrique de Carvalho e Silva.

O presente trabalho consta de um estudo comparativo, em laboratório, do comportamento mecânico de misturas betuminosas a frio e a quente para fins de pavimentação de vias, empregando agregados procedentes da pedreira da cidade de Ervália, Estado de Minas Gerais, Brasil. Os ligantes betuminosos utilizados foram: emulsões asfálticas catiônicas RL – 1C e RM – 1C e o cimento asfáltico de petróleo CAP 50-70. Misturas betuminosas a frio e a quente foram preparadas de acordo com as energias de compactação recomendadas pelo Instituto de Asfalto (75 golpes para tráfego pesado e 50 golpes para tráfego médio). Inicialmente, obteve-se uma composição granulométrica para os agregados que atendeu simultaneamente às faixas C e B das especificações de serviço do DNIT para misturas betuminosas a frio e a quente, respectivamente. Para a dosagem das misturas utilizou-se o método Marshall para obtenção do teor de projeto de ligante de cada uma delas. Nessas condições e nas suas proximidades, além do ensaio anteriormente citado, empregaram-se também os seguintes ensaios para o estudo do desempenho mecânico das misturas: resistência à tração por compressão diametral e triaxial de cargas repetidas. Para as misturas betuminosas a frio, a influência da energia de compactação não foi significativa no que se refere à fluência, porcentagem de vazios e estabilidade, visto que os valores obtidos para estes parâmetros foram próximos para as duas energias de compactação investigadas.

## ABSTRACT

MONTANARI, Rodrigo Marques, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2007. **Study of the mechanical behavior of cold and hot bituminous mixtures for pavement surface application.** Adviser: Carlos Alexandre Braz de Carvalho. Co-advisers: Dario Cardoso de Lima and Cláudio Henrique de Carvalho e Silva.

The present work consists of a laboratory comparative study of the mechanical behavior of hot and cold bituminous mixtures for pavement surface application using aggregates from the quarry of the city of Ervália, Minas Gerais state, Brazil. RL-1C and RM-1C cationic asphalt emulsions, as well CAP 50-60 asphalt cement were used throughout the study. Hot and cold bituminous mixtures specimens were compacted using the medium and heavy traffic compaction efforts recommended by the Asphalt Institute (75 blows for heavy traffic, and 50 blows for medium traffic). Initially, a grain size composition of the aggregates was generated in order to attend the aggregate distributions B and C of the DNIT, respectively, for hot and cold bituminous mixtures. Aggregate mixtures optimum bitumen contents were determined via the Marshall test. Others strength tests performed in the bituminous mixtures around at the optimum bitumen contents were as follows: indirect tensile strength test and triaxial repeated loading test. From an engineering point of view and regarding the parameters creep, void percentage and stability of hot and cold bituminous mixtures, influence of applied compaction effort was not significant since values obtained from the Marshall tests using both compaction efforts did not differ significantly.

# 1 – INTRODUÇÃO

## 1.1 – Natureza do Problema

O tráfego nas rodovias é muito variado quanto ao tipo de veículos e cargas transportadas. Uma das dificuldades no dimensionamento de pavimentos é a avaliação do poder de destruição que exercem as várias cargas a diferentes níveis de repetição (MEDINA, 1997). Esta variação de cargas é que proporciona diferentes níveis de tensões ao longo da estrutura da rodovia que, aliadas às ações climáticas, atuam no pavimento provocando deformações. A consequência é a degradação acelerada dos pavimentos que provoca um desgaste maior do veículo afetando a segurança dos usuários.

De acordo com CARVALHO (1997), reproduzir, em laboratório, as condições de campo a que estão sujeitos os materiais num pavimento em serviço, para estudo de suas características de deformabilidade é uma tarefa extremamente difícil. Mas, dependendo do tipo do ensaio utilizado e do seu desenvolvimento tecnológico e, ainda, da abordagem requerida para a sua realização, pode-se investigar, em laboratório, com apreciável reprodução das condições que ocorrem no campo, o comportamento dos materiais do ponto de vista tensão-deformação. Essas informações, obtidas em

laboratório, são muito úteis para projeto de pavimentos e para a estimativa de seu desempenho, no decorrer de toda a vida útil da via.

O revestimento, também chamado de capa de rolamento, por receber diretamente a ação do tráfego, é a camada mais nobre do pavimento. Esta camada deve, preferencialmente, ser impermeável, durável, estável e apresentar boas condições de rolamento e aderência aos veículos que nela circulam. Essas características são indispensáveis ao conforto e segurança dos usuários que utilizam a rodovia. As camadas seguintes, subjacentes ao revestimento, em geral, são granulares e a resistência ao cisalhamento dessas camadas deve-se basicamente ao atrito entre as partículas de seus materiais constituintes. Portanto, um revestimento mal projetado acarretará defeitos prematuros e com isso, as camadas subjacentes ao revestimento ficarão desprotegidas e se deteriorarão rapidamente, com ações do tráfego e do clima, afetando consideravelmente a vida útil da via.

Segundo SANTOS (2002), é necessário analisar criteriosamente os materiais a serem empregados nos revestimentos asfálticos e os parâmetros de projeto. Esses estudos são importantes para se obter uma mistura de boa qualidade. A caracterização tecnológica dos agregados e do ligante asfáltico, bem como o conhecimento do comportamento mecânico da mistura são cuidados indispensáveis.

## **1.2 – Relevância do Trabalho**

A partir da década de 50, com a queda do preço do petróleo, algumas vias e rodovias passaram a ser construídas com revestimentos asfálticos. Desde então, o emprego do material espalhou-se por todo o Brasil. Atualmente, o que se observa, na maioria das cidades, independente do seu porte territorial, é que boa parte de suas vias é asfaltada.

A maioria das rodovias pavimentadas no Brasil possui revestimento asfáltico e são elas responsáveis pelo maior volume de transporte de cargas e passageiros do país. De acordo com a Pesquisa Rodoviária CNT (2006), o setor de transporte rodoviário detém cerca de 96,2% da matriz de transporte de passageiros e de 61,8% da matriz de transporte de cargas, uma

operação que corresponde a 70% do PIB. Esses dados elucidam o importante papel das estradas na economia do Brasil. Esta pesquisa confirmou também a urgente necessidade de se melhorar as condições de serventia das estradas, no sentido de aumentar a segurança e o conforto dos usuários e reduzir os custos operacionais dos veículos.

Em Viçosa-MG, a situação dos pavimentos urbanos é sem dúvida comprometedor. Notam-se inúmeras ruas onduladas e esburacadas que causam sérios problemas de conforto e segurança aos seus habitantes. Assim, são necessários serviços de reconstrução e/ou manutenção dessas vias para melhorar as suas condições de serventia.

Observa-se que as misturas a frio, provavelmente por razões de natureza econômica e de propiciar maior período de estocagem em relação às misturas a quente, vêm sendo utilizadas em larga escala por várias prefeituras da microrregião de Viçosa-MG. Um fato que merece atenção é que essas prefeituras ainda não dispõem de condições adequadas de analisar as características de dosagem das misturas e também as características tecnológicas dos materiais nelas utilizados. A ausência de controle da mistura acarreta, na maioria das vezes, a adoção de capas asfálticas de má qualidade, afetando o desempenho do pavimento como um todo.

Segundo SENÇO (1997), um benefício é um valor que, em consequência de uma determinada ação, retorna a uma pessoa física ou jurídica, pública ou privada, aumentando os valores de que já se dispõem. A pavimentação de uma via de terra existente ou serviços de melhoramentos numa via com pavimento em mau estado enquadram-se perfeitamente na definição de benefício, pois se traduzirão para os usuários em redução do custo de operação, dos tempos de viagem e de percurso e outras vantagens que podem ser resumidas como de economia do custo geral do transporte.

Um estudo comparativo do comportamento mecânico de misturas betuminosas a frio e a quente, em laboratório, poderá trazer importantes informações para a utilização de revestimentos betuminosos mais apropriados para a pavimentação de vias. Misturas betuminosas inadequadas são responsáveis pelo surgimento prematuro de diversos tipos

de defeito, destacando-se o trincamento por fadiga e os afundamentos de trilhas-de-roda. Com o surgimento dos defeitos, as camadas inferiores ao revestimento vão ficando desprotegidas, acelerando-se assim o processo de degradação do pavimento. Assim, o desenvolvimento de pesquisas na área de misturas betuminosas é sem dúvida relevante.

### **1.3 – Objetivos**

O presente trabalho teve por objetivos estudar o comportamento mecânico de misturas betuminosas a frio e a quente produzidas a partir de uma mesma composição granulométrica de agregados, em obediência às especificações de serviço do Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transporte (DNIT), quais sejam: DNER – ES 317/97 e DNIT 031 2004 – ES. Empregaram-se os ensaios: Marshall, resistência à tração por compressão diametral e triaxial de cargas repetidas. Analisaram-se, ainda, a influência da energia de compactação nos resultados de ensaios Marshall e o desempenho das misturas quanto às deformações permanentes determinadas em ensaios triaxiais de cargas repetidas.

### **1.4 – Organização do Trabalho**

Além do tópico 1 - Introdução, esta dissertação é composta de mais quatro tópicos, conforme segue. Tópico 2 - Revisão Bibliográfica: consta de uma revisão bibliográfica sobre assuntos pertinentes ao entendimento e desenvolvimento do trabalho. Abordam-se várias considerações sobre as misturas betuminosas e seus materiais constituintes. Também, sobre o comportamento mecânico e os métodos de ensaios empregados. Tópico 3 - Materiais e Métodos: são apresentados os materiais utilizados na pesquisa, suas caracterizações e os métodos e equipamentos empregados na realização da fase experimental. Tópico 4 – Análise e Discussão dos Resultados: são apresentados os resultados obtidos de ensaios de laboratório seguidos de uma análise e discussões sobre os mesmos. No

tópico 5, são apresentadas as conclusões do trabalho e algumas sugestões para futuras pesquisas.



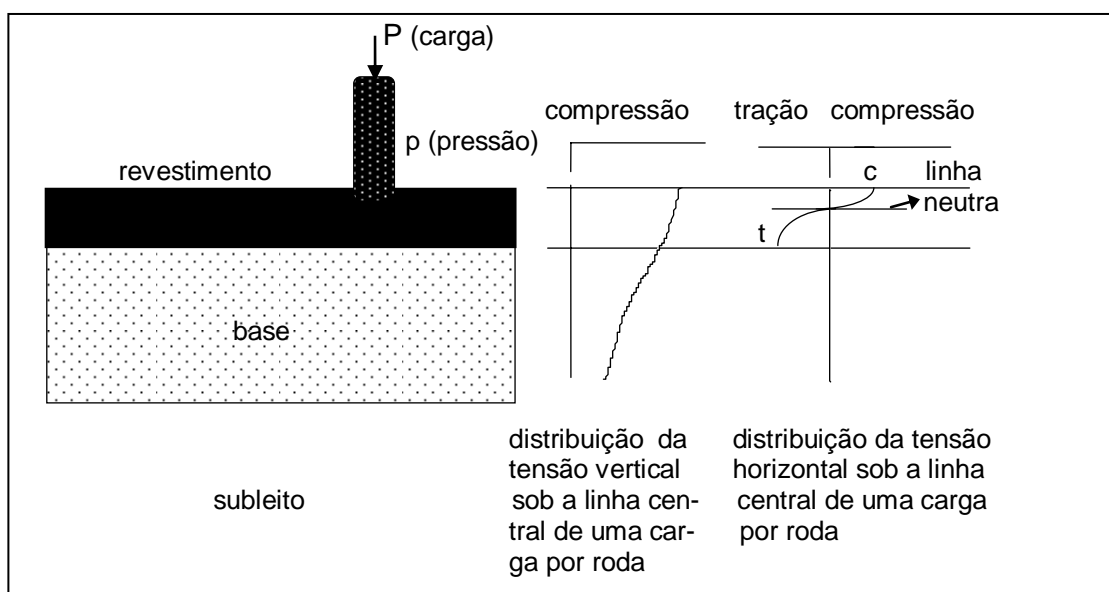
## **2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste tópico, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre o assunto a ser desenvolvido no presente trabalho, com abordagens sobre misturas betuminosas e seus materiais constituintes, comportamento mecânico e ensaios empregados.

### **2.1 – Misturas Betuminosas**

As misturas betuminosas são uma combinação de materiais mineral e ligante betuminoso em proporções adequadas definidas em laboratório. Os materiais minerais participam com mais de 90% em peso da mistura. O restante é a contribuição do ligante betuminoso. Essas misturas podem ser realizadas a frio ou a quente. Têm seu emprego no revestimento de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Recebem diretamente a ação do tráfego e do clima, devendo, portanto, serem resistentes para que a via cumpra bem o seu papel. A Figura 2.1 ilustra a distribuição das tensões verticais e horizontais, sob o centro de uma carga por roda, num pavimento flexível. Observa-se que a camada do revestimento, por ser constituída de uma mistura de agregado mais ligante betuminoso oferece resistência tanto à tração quanto à compressão. A função de resistir aos esforços de tração

atribui-se à presença do ligante betuminoso que atua aglutinando os agregados e conferindo à mistura um ganho de resistência associado, principalmente, à parcela coesiva. Já a camada de base, os materiais granulares que a compõem não oferecem resistência à tração, sendo portanto mobilizadas apenas as tensões de compressão.



**Figura 2.1: Distribuição típica de tensão sob uma roda com carga  $P$  (Fonte: HAAS e HUDSON, 1978)**

LIMA e BUENO (1981) comentam que nas misturas betuminosas, o agregado suporta e transmite às camadas inferiores do pavimento as cargas aplicadas pelos veículos, bem como resiste ao desgaste imposto pelas solicitações do tráfego. O asfalto é o elemento aglutinante que proporciona uma ligação íntima entre eles. É resistente à ação desagregadora do tráfego e desempenha uma função impermeabilizante contra a ação das águas provenientes das chuvas e do subleito por atividade capilar.

HAAS, HUDSON e ZANIEWSKI (1994) citam vários fatores ambientais que exercem influência no desempenho dos pavimentos. Dentre eles destacaram: a precipitação pluvial ou umidade, a temperatura e a radiação solar. Comentam ainda sobre o efeito nocivo da água num revestimento asfáltico; a mesma pode remover a película betuminosa e provocar a desagregação do concreto asfáltico. A temperatura, independente de ser alta ou baixa, pode ter efeitos comprometedores no

desempenho dos pavimentos. Altas temperaturas causam amolecimento do concreto asfáltico reduzindo a sua rigidez e a sua viscosidade; baixas temperaturas alteram o módulo de deformação do concreto asfáltico, provocando perda de sua flexibilidade. A radiação solar, incidindo sobre o material betuminoso, facilita a volatilização da sua porção de peso molecular mais leve, provocando o endurecimento da superfície do concreto asfáltico.

### 2.1.1 – Tipos de Revestimentos Asfálticos

O Quadro 2.1 contém diversos tipos de revestimentos asfálticos que podem ser empregados em pavimentos rodoviários. A seguir, serão apresentados alguns informes sobre cada um deles.

**Quadro 2.1: Tipos de revestimentos asfálticos empregados em pavimentos de rodovias**

Revestimentos Asfálticos	
Por penetração	Macadame betuminoso
	Tratamentos superficiais
Por mistura	Concreto asfáltico
	Misturas a quente
	Pré-misturado a quente (PMQ)
	Areia asfalto a quente
	Pré-misturado a frio (PMF)
	Misturas a frio
	Areia asfalto a frio
	Lama asfáltica

FONTE: Adaptado de SANTANA (1993)

#### a) Macadame betuminoso por penetração

Consiste na superposição de camadas de agregados interligadas por aplicações de ligante betuminoso. Os agregados utilizados têm dimensões e quantidades especificadas, devidamente espalhados e compactados. Dependendo do número de aplicações de agregados, pode ser duplo ou

triplo. Pode ser empregado como base, reforço ou revestimento (DNER - ES 311/97).

#### **b) Tratamentos Superficiais**

Consistem na aplicação de uma ou mais camadas sucessivas de agregado e ligante betuminoso. O agregado é colocado uniformemente sobre o material asfáltico e em seguida submetido à operação de compressão e acabamento. Dependendo do número de camadas podem ser: simples, duplo ou triplo (DNER - ES 308/97, DNER - ES 309/97 e DNER - ES 310/97).

#### **c) Concreto Asfáltico**

É tido como um dos mais eficientes revestimentos asfálticos. Consiste na mistura em usina apropriada de agregado e ligante betuminoso satisfazendo a rigorosas especificações. Tanto os agregados quanto os ligantes são aquecidos à temperaturas que dependem da viscosidade do ligante. A mistura é espalhada e comprimida a quente. Apresenta-se como o serviço de mais acurado controle dos que compõem as etapas da pavimentação.

O agregado a ser utilizado no concreto asfáltico deverá ser constituído de grãos sãos, duráveis, livres de torrões de argila e substâncias nocivas. Caso seja necessário melhorar a adesividade, deverão ser adicionados ao CAP aditivos denominados melhoradores de adesividade (FERNANDES JÚNIOR, 1992).

No preparo da mistura, o CAP deve ser aquecido a uma temperatura na qual a sua viscosidade Saybolt-Furol se enquadra na faixa de 75 a 150 SSF; a temperatura nunca deverá ser superior a 177°C, para evitar o fenômeno de craqueamento. Os agregados devem ser aquecidos a uma temperatura de no mínimo 10°C e no máximo 15°C superior à do CAP (FERNANDES JÚNIOR, 1992).

Essas misturas necessitam de equipamentos especiais para a sua produção. Sob o ponto de vista construtivo, não permitem a estocagem. Por

outro lado, têm a seu favor maior durabilidade; são menos sensíveis à ação da água e suportam bem o tráfego pesado e não exigem tempo de cura.

Maiores informações sobre este tipo de revestimento podem ser encontradas em DNIT 031-2004-ES.

**d) Pré-Misturado a Quente**

Também consiste em uma mistura a quente de agregados e ligante betuminoso em usina apropriada, sendo a mesma espalhada e comprimida a quente. Difere do concreto asfáltico por serem as suas especificações menos rigorosas. Pode ser empregado como camada de regularização, base e revestimento (SENÇO, 2001).

**e) Areia Asfalto a Quente**

É uma mistura a quente, em usina apropriada, de agregado miúdo e cimento asfáltico de petróleo (CAP). São misturados em proporções convenientes e devidamente compactados (DNIT - ES 032/200).

**f) Pré-Misturado a Frio (PMF)**

É uma mistura executada à temperatura ambiente em usina apropriada, composta de agregado mineral graduado, material de enchimento (filer) e de emulsão asfáltica, espalhada e comprimida a frio (DNER - ES 317/97). Para a dosagem desse tipo de mistura, são vários os indicadores de desempenho utilizados, como por exemplo: índice de vazios da mistura, estabilidade Marshall, relação betume-vazios, fluência, entre outros.

SANTOS (2002) cita inúmeras vantagens de se trabalhar com os PMF, principalmente quando são utilizados os asfaltos emulsionados como ligante. Por exemplo: os equipamentos necessários para a sua produção são de custo inferior aos das misturas a quente; o agregado pode se encontrar ligeiramente úmido, facilitando o seu envolvimento pelo ligante; não necessitam de aquecimento dos agregados; os seus efeitos ambientais decorrentes da emissão de gases são menos comprometedores em relação aos das misturas a quente e são menores os riscos de incêndios, explosões

e acidentes de trabalho; facilidade na preparação da massa e execução; permitem estocagem por algum tempo; os de granulometria aberta podem ser armazenados por períodos maiores que os de granulometria densa. O limite de estocagem recomendado para o de granulometria densa é sete dias.

O pré-misturado a frio pode ser utilizado como revestimento, camada de regularização, base de pavimento, tapa-buracos, conservação e recapeamentos.

**g) Areia Asfalto a Frio**

É o produto resultante da mistura, em equipamento apropriado, de emulsão asfáltica catiônica, agregado miúdo, com a presença ou não de material de enchimento (filer), espalhado e compactado a frio. Este tipo de serviço se aplica na regularização - camada final de revestimento asfáltico e serviços do tipo tapa-buracos em vias de baixo volume de tráfego (ABEDA, 2001).

**h) Lama Asfáltica**

Não se constitui em um revestimento propriamente dito, mas é uma mistura de agregado mineral, material de enchimento (filer), emulsão asfáltica e água, de consistência fluida aplicada uniformemente sobre uma superfície previamente preparada à temperatura ambiente. Tem a finalidade de impermeabilização e melhorias das condições de rolamento do pavimento (DNER - ES 314/97).

Existem outros tipos de revestimentos asfálticos que vêm sendo empregados em pavimentos de rodovias. Para fins de informação, na página [http://www.dnit.gov.br/ipr\\_new](http://www.dnit.gov.br/ipr_new), já se encontram disponibilizadas especificações de serviço para os revestimentos apresentados no Quadro 2.1, em que os ligantes asfálticos são de asfaltos modificados com polímero. O micro revestimento asfáltico é um tipo de mistura aplicado a frio, em camadas delgadas de até 15 mm de espessura, sobre pavimentos que ainda encontram-se estruturalmente adequados, mas que já apresentam a

superfície de rolamento desgastada. Este tipo de mistura, quando aplicado adequadamente e em época oportuna, restabelece a integridade funcional do pavimento e preserva a sua condição estrutural. Os materiais que compõem o micro revestimento asfáltico são os seguintes: agregados minerais de alta qualidade com até 12 mm de diâmetro; emulsão asfáltica catiônica especial com polímeros que se destaca pelas suas características elásticas em baixas e altas temperaturas; filer mineral (preferenciais: cimento Portland e a cal hidratada) com a função de melhorar a coesão final do sistema; fibras (opcionais) – empregadas para aumentar a flexibilidade e a resistência mecânica do sistema e aditivos químicos com a função de regular a ruptura da emulsão e a cura do sistema (REIS e SANTO, 2000).

Outro tipo de mistura que vem sendo pesquisada nesses últimos anos é o asfalto-borracha. ODA (2000) analisou a viabilidade técnica do emprego do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação. A borracha utilizada foi proveniente de pneus de automóveis e caminhão e apresentou a seguinte granulometria em termos de porcentagem em peso passando nas peneiras: # 40 (0,42 mm), 92%; # 50 (0,30mm), 86%; # 100 (0,15 mm), 6% e # 200 (0,075 mm), 1%. Os teores de borracha utilizados no experimento variaram de 6%, 12%, 18% e 24% empregando-se os ligantes asfálticos CAP 20 e CAP 40. Uma das conclusões da pesquisa, baseada em resultados de ensaios de laboratório, é que a mistura asfalto-borracha pode ser benéfica aos pavimentos no sentido de melhorar a resistência da mistura quanto ao acúmulo de deformação permanente e trincamento por fadiga.

## **2.2 – Agregados**

Segundo SENÇO (1997), os agregados são materiais inertes, granulares, sem forma e dimensões definidas, com propriedades adequadas a compor camadas ou misturas para utilização nos mais diversos tipos de obras de engenharia civil. Nos serviços de pavimentação, têm seu emprego destinado às misturas betuminosas, concreto de cimento, bases de calçamentos, lastros entre outras aplicações.

No caso das misturas betuminosas, em geral, sua participação em volume, excede cerca de três quartos do volume total. Assim, para um bom desempenho da mistura a ser executada é importante o conhecimento das características tecnológicas dos agregados a serem empregados.

### 2.2.1 – Classificação dos Agregados

Segundo o MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - DNIT (2006), os agregados usados em pavimentação podem ser classificados segundo a natureza, tamanho e distribuição dos grãos. O Quadro 2.2 contém várias informações sobre a classificação dos agregados.

**Quadro 2.2: Classificação dos agregados**

Natureza	Natural	Grãos oriundos da alteração das rochas pelos processos de intemperismo ou produzidos por britagem
	Artificial	Grãos são produtos ou subprodutos de processo industrial por transformação física e química do material
Tamanho	Graúdo	Fração retida na peneira nº 10 (2,0 mm)
	Miúdo	Fração que passa na peneira nº 10 e é retida na peneira nº 200 (0,075 mm)
	Material de enchimento	Fração que passa pelo menos 65% na peneira nº 200
Distribuição dos Grãos	Denso	Curva granulométrica contínua e bem graduada com material fino suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores
	Aberto	Curva granulométrica contínua e bem graduada, mas com deficiência de finos.
	Tipo macadame	Granulometria uniforme com diâmetro máximo aproximadamente o dobro do diâmetro mínimo

Fonte: MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - DNIT (2006)

### 2.2.2 – Características Tecnológicas

De acordo com o MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - DNIT (2006), as principais características tecnológicas dos agregados de interesse nos serviços de pavimentação rodoviária são as seguintes:



**a) Granulometria**

Representada pela curva granulométrica. Se a granulometria for contínua, pode ser densa, aberta e uniforme. O atendimento da faixa de granulometria para um determinado tipo de mistura é uma sinalização das mais importantes para o seu bom desempenho.

**b) Forma**

Avaliada pelo índice de forma; em função do seu valor pode-se obter uma melhor estabilidade para as misturas. Para um melhor entrosamento entre os grãos e uma menor área específica, recomenda-se a forma cúbica.

**c) Absorção de água**

Indica a quantidade de água que um agregado é capaz de absorver quando exposto à mesma.

**d) Resistência ao choque e ao desgaste**

Está associada à ação do tráfego ou aos movimentos recíprocos das diversas partículas. O choque é avaliado pelo ensaio Treton e o desgaste pelo ensaio Los Angeles. A partir desses ensaios, pode-se vetar o uso de um determinado agregado, caso os resultados encontrados se encontrarem fora das especificações.

**e) Durabilidade**

É uma medida da resistência que o agregado apresenta ao intemperismo.

**f) Limpeza**

Para serem utilizados na pavimentação betuminosa, os agregados devem ser isentos de substâncias nocivas, tais como matéria orgânica, argila, silte ou outro material prejudicial.

### g) Adesividade

Uma das mais importantes características da combinação dos agregados e ligante. Numa mistura asfáltica, deve ocorrer uma adequada ligação entre as partículas do agregado e o ligante betuminoso, isto para evitar o possível deslocamento da película betuminosa pela ação de água. A adesividade satisfatória pode ser conseguida mediante o emprego de pequenas porcentagens de substâncias melhoradoras de adesividade.

### h) Massa específica unitária e massa específica dos grãos

A massa específica unitária possibilita transformar a dosagem em peso para volume e vice-versa, muito empregada nos serviços de pavimentação. A massa específica dos grãos pode auxiliar na identificação da natureza da rocha que deu origem ao agregado.

Informações sobre outros índices físicos, como umidade, índice de vazios, porosidade que correlacionam os pesos e os volumes das três fases são empregados para identificar as condições físicas dos agregados. Na Figura 2.2, as três fases estão separadas proporcionalmente aos volumes que ocupam, facilitando a definição e a determinação das relações entre elas (SOUZA, 1980). Os volumes de cada fase são apresentados à direita e os pesos à esquerda.

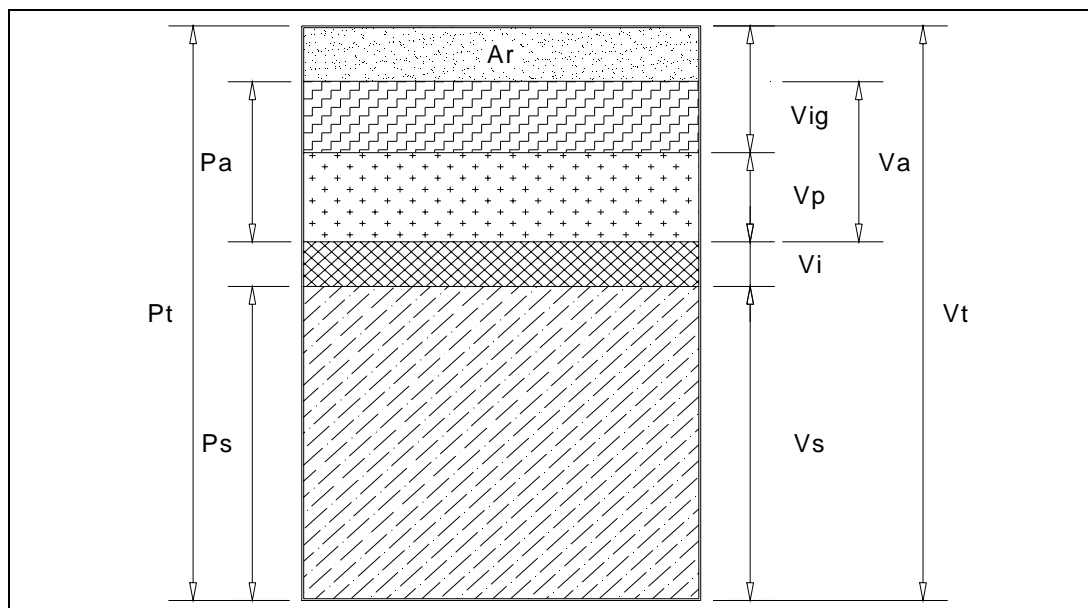


Figura 2.2: Amostra de agregado com suas parcelas de volume e peso (Fonte: SOUZA, 1980)

Em que:

- $V_t$ : volume total da amostra do agregado,
- $V_s$ : volume dos sólidos das partículas,
- $V_i$ : volume de vazios impermeáveis,
- $V_p$ : volume de vazios permeáveis,
- $V_{ig}$ : volume intergranular de vazios que existe entre as partículas dos agregados,
- $V_a$ : volume de água contido no agregado. Este volume pode variar de 0 a  $V_p + V_{ig}$ .
- $P_s$ : peso seco das partículas do agregado,
- $P_a$ : peso da água contida no agregado,
- $P_t$ : é a soma de  $P_a + P_s$  e corresponde ao peso total da amostra do agregado.

### 2.3 – Materiais Betuminosos

O termo *material betuminoso* é geralmente usado para denotar substâncias nas quais o betume está presente. Segundo SENÇO (1997), betumes são combinações de hidrocarbonetos produzidos naturalmente ou por combustão, ou por ambos associados, encontrados freqüentemente acompanhados por derivados não-metálicos e sempre completamente solúveis no bissulfeto de carbono.

Para aplicações na engenharia civil, os materiais betuminosos incluem principalmente asfaltos. Os asfaltos são materiais aglutinantes, de cor escura, constituídos por misturas complexas de hidrocarbonetos não voláteis de elevada massa molecular podendo ocorrer naturalmente ou serem obtidos da refinação do petróleo. Os alcatrões não ocorrem naturalmente e são obtidos de processos de destilação do carvão, petróleo, madeira ou outros materiais orgânicos. Nos últimos anos, o uso de alcatrões em construções rodoviárias tem sido muito limitado devido à preocupação com a possível emissão de gases perigosos quando são aquecidos (TIA, 2003).

De acordo com o IBP (1999), a maior parte dos asfaltos fabricados (cerca de 90%) é utilizada em trabalhos de pavimentação, destinando-se uma pequena parte a aplicações industriais, como impermeabilizantes, isolantes, etc.

### **2.3.1 – Asfaltos para Pavimentação**

Nas obras de pavimentação a maior parcela dos asfaltos usados constitui os asfaltos resultantes da refinação do petróleo, do qual é obtido isento de impurezas, sendo quase completamente solúvel em bissulfeto de carbono ou tetracloreto de carbono.

Segundo o IBP (1999), a quantidade de asfalto contida num petróleo é variável e depende de várias características, principalmente da densidade, podendo variar de 10% a 70%. Os processos de refinação do petróleo para obtenção de asfaltos dependem do tipo de petróleo e do rendimento em asfalto que ele apresenta. Se o rendimento em asfalto for alto e a parcela cru apresentar características asfálticas, basta o estágio de destilação a vácuo. Para os petróleos que apresentam médio rendimento em asfalto e são do tipo intermediário, o processo é o da destilação em dois estágios: um sob pressão atmosférica seguido de outro a vácuo. Se o petróleo é do tipo leve, além do esquema anteriormente citado, inclui-se um processo de extração após o segundo estágio de destilação. Desses processos, o mais usado é o da destilação em duas etapas, pois produz o asfalto normalmente sem necessidade de instalações especiais e permite o uso de um maior número de petróleos e consiste, basicamente, de uma separação física dos vários constituintes do petróleo, pela diferença entre seus pontos de ebulição e de condensação.

Os tipos de asfaltos para a pavimentação são os que seguem:

#### **a) Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)**

O CAP é o asfalto obtido especialmente para apresentar características adequadas para o uso na construção de pavimentos. É um material complexo que apresenta um comportamento viscoso, caracterizado

pela diminuição da rigidez para longos períodos de aplicação de carga, e susceptibilidade térmica, caracterizada pela alteração de propriedades (viscosidade, rigidez, consistência) em função da temperatura (CASTRO, 2003).

Segundo ODA (2000), somente sob condições bem específicas o CAP se comporta como um sólido elástico (baixa temperatura e pequeno tempo de carregamento) ou como líquido viscoso (alta temperatura e grande tempo de carregamento). Para ser utilizado em pavimentação, o asfalto, material termoplástico que é semi-sólido à temperatura ambiente, precisa ser aquecido para atingir a viscosidade adequada à mistura (> 100°C).

São obtidos em diferentes consistências medidas pelo ensaio de viscosidade dinâmica e constitui o produto básico a partir do qual se preparam vários tipos de materiais para pavimentação. De acordo com o Regulamento Técnico N°3/2005 da Resolução ANP nº 19 de 11/07/2005, os cimentos asfálticos de petróleo (CAPs) podem ser classificados segundo a penetração nos seguintes tipos, conforme segue: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200.

#### **b) Asfaltos Diluídos**

Os asfaltos diluídos resultam da mistura do CAP com derivados de petróleo mais leves, que proporcionam produtos menos viscosos e podem ser aplicados à temperaturas inferiores e com o agregado frio. Os diluentes utilizados funcionam apenas como veículos, após a aplicação nos serviços de pavimentação, evaporam-se, denominando-se tempo de cura, ou simplesmente cura, o espaço de tempo necessário a essa evaporação (CASTRO, 2003).

Os asfaltos diluídos são classificados em função do tipo de solvente que é misturado ao CAP: cura rápida, CR (nafta); cura média, CM (querosene) e cura lenta, CL (óleo diesel). Há muitos anos que não se utiliza no Brasil os asfaltos diluídos de cura lenta.

De acordo com o Regulamento Técnico DNC nº 03/97 – Portaria nº 43 de 29/09/1997, os asfaltos diluídos são classificados em: CR-70, CR-250,

CM-30 e CM-70 (IBP,1999). Os números representam o início da faixa de viscosidade cinemática atingida em cada caso.

### **c) Emulsões Asfálticas**

As emulsões asfálticas são misturas de CAP dispersos na fase água produzidas, normalmente, através de um processo mecânico em equipamentos de alta capacidade de cisalhamento, denominados moinhos coloidais. A presença de um agente emulsificante tem o objetivo de dar uma certa estabilidade ao conjunto, de favorecer a dispersão e de revestir os glóbulos de betume de uma película protetora, mantendo-os em suspensão (ABEDA, 2001).

Os agentes emulsificantes, usados em pequenas quantidades, de 0,5% a 1,5% em peso, conferem cargas elétricas, positivas ou negativas, e em alguns casos não conferem ionicidade às emulsões, classificando as mesmas em catiônicas, aniônicas e não iônicas, respectivamente. Dependendo da quantidade de CAP envolvido na fabricação das emulsões, elas podem se classificar em 1C e 2C, onde a terminologia C indica do tipo catiônica e os números estão associados à viscosidade relativa e quantidades de CAP empregado na fabricação (ABEDA, 2001).

A separação da fase água da fase asfalto é conhecida como ruptura da emulsão. O processo de ruptura ocorre quando a emulsão entra em contato com o agregado. A velocidade em que ocorre esta separação depende do tipo de emulsão, reatividade/superfície específica dos agregados, teor de umidade dos mesmos e da temperatura dos materiais e ambiente (ABEDA, 2001).

O tempo necessário para que ocorra essa separação confere às emulsões características intrínsecas à aplicação no campo, servindo, também como base para a sua classificação quanto à velocidade de ruptura. Assim, a seguinte nomenclatura é obedecida:

- a) RR – emulsão de ruptura rápida;
- b) RM – emulsão de ruptura média e
- c) RL – emulsão de ruptura lenta.

Reconhecidas mundialmente pelo seu melhor desempenho no que se refere a sua compatibilidade com a maioria dos agregados minerais, as emulsões asfálticas para pavimentação, empregadas no Brasil, são, predominantemente, do tipo catiônicas (ABEDA, 2001).

A principal vantagem de se empregar a emulsão asfáltica em serviços de pavimentação reside na sua utilização à temperatura ambiente, evitando-se a necessidade de gastos com aquecimento do ligante e dos agregados.

#### **d) Asfaltos Modificados**

São combinações de alguns produtos e asfaltos compatíveis com o intuito de se obterem misturas com maiores durabilidade e elasticidade. De acordo com SANTOS (2002), os asfaltos modificados podem ser assim classificados: agentes de reciclagem/agentes de rejuvenescimento; asfaltos modificados por produtos naturais e asfalto modificado com polímero.

### **2.4 – Comportamento Mecânico**

Para se estudar o comportamento mecânico de misturas asfálticas são vários os fatores e variáveis que podem ser utilizados. A escolha de cada um deles vai depender do enfoque da pesquisa e, também, da infraestrutura de laboratório disponível para a realização do trabalho. SANTOS (2002) apresentou vários fatores e variáveis que se inter-relacionam para se estudar o desempenho de misturas asfálticas. Ver Quadro 2.3.

Com relação ao fator carga, é mais comum, nos ensaios triaxiais cíclicos, aplicar somente a tensão desviadora axial pulsante, mantendo-se constante a pressão de confinamento. Entretanto, ambas podem ser cíclicas. Para cada um desses casos e mantendo-se a mesma amplitude de tensão é de se esperar resultados diferentes no comportamento mecânico dessas misturas.

**Quadro 2.3: Fatores e variáveis para estudo do comportamento mecânico das misturas asfálticas**

<b>Comportamento mecânico de misturas asfálticas - fatores e variáveis que se inter-relacionam</b>	
<b>Fatores</b>	<b>Variáveis</b>
Carga	Amplitude da tensão
	Número de aplicação da tensão
	Geometria da onda de carregamento (quadrada, triangular, senoidal, etc.)
	Tipo de tensão (compressão, tração estado triaxial de tensão, etc.)
	Tempo de ciclo do carregamento
	Duração do carregamento
Qualidade da mistura	Amplitude da energia de compactação
	Método de compactação (pressão, impacto e vibração)
	Características tecnológicas dos agregados
	Porcentagens em peso dos agregados na mistura
	Tipo do ligante asfáltico
Características ambientais	Porcentagem em peso do ligante na mistura
	Umidade
	Temperatura
	Radiação solar
Tempo	Período de análise de desempenho das misturas em campo e em laboratório

Fonte: adaptado de SANTOS (2002)

De acordo, ainda, com SANTOS (2002), a consistência de um ligante betuminoso é significativamente afetada pela variação da temperatura. Portanto, a temperatura exerce uma influência das mais significativas no estudo do comportamento mecânico das misturas betuminosas. Dependendo de seu valor, o ligante asfáltico pode se tornar líquido, semi-sólido e sólido e para cada um desses estados físicos do ligante, a resistência da mistura varia consideravelmente. O tempo de aplicação da carga é outro fator importante no estudo do desempenho de misturas betuminosas.

COELHO (1996) comenta que a reologia dos materiais asfálticos consiste no estudo da deformação e do fluxo (fluência) quando sujeitos a um carregamento qualquer, levando-se em consideração o tempo de duração desse carregamento e a temperatura a que estão submetidos. Destaca também, que as misturas asfálticas são muito sensíveis às mudanças de



temperatura, exibindo características que no meio técnico denomina-se suscetibilidade térmica.

Para SILVA (1998), os pavimentos asfálticos têm sido considerados como materiais de comportamento visco-elastoplástico, sendo aceitável a aplicação da hipótese elástico-linear, quando o tempo de duração do carregamento for relativamente curto e a temperatura de serviço for relativamente baixa (inferior a 25°C).

Segundo SOUZA (1997), os materiais asfálticos dependendo da temperatura e da intensidade e duração da carga, podem apresentar comportamento elástico linear, isto é, exibem uma relação de proporcionalidade entre tensões e deformações. No entanto, alguns aspectos devem ser considerados em relação ao módulo a ser utilizado. Como sua deformabilidade depende da temperatura e do tempo de aplicação da carga, usa-se o termo “módulo de rigidez”, no qual estão incluídas as seguintes deformações:

- resiliente, recuperada quase instantaneamente após a retirada da carga e;
- elástica retardada, que manifesta o comportamento viscoelástico dos ligantes betuminosos.

Ainda, segundo SOUZA (1997), na prática rodoviária, interessa a zona de transição entre o comportamento elástico e viscoso, pois ela representa tempos de duração da carga encontrados numa rodovia pavimentada.

Em síntese, através das considerações anteriormente apresentadas e pelas informações contidas no Quadro 2.3 pode-se ter idéia das dificuldades que se encontram quando se pretende estudar o comportamento mecânico de misturas asfálticas.

#### **2.4.1 – Ensaios Utilizados em Misturas Betuminosas**

São vários os ensaios que podem ser empregados para avaliar o comportamento mecânico de misturas betuminosas. Dentre eles, os mais empregados no Brasil são os que seguem.

## **a – Método Marshall**

Concebido por Bruce G. Marshall, em 1930, com o intuito de permitir a determinação da quantidade ótima de ligante para a composição de misturas asfálticas preparadas a quente, para fins de pavimentação rodoviária. Em 1980, o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) oficializou o método de ensaio Marshall modificado para pré-misturados a frio, proposto por J. Lopes e Kasuga, com algumas modificações, sob o número DNER - ME 107/94 (SILVA, 1998). Para misturas betuminosas a quente, este ensaio está normalizado pelo Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT), sob a designação DNER - ME 043/95.

Devido à sua propagação por grande parte do mundo e grande experiência prática adquirida com seu emprego tornou-se um dos mais utilizados para avaliar o desempenho de misturas asfálticas, tanto a quente como a frio.

Ao longo dos anos foi modificado para adaptar-se à realidade do aumento de carga e da pressão dos pneus dos veículos e dentre às modificações foram sugeridos novos critérios para a determinação da quantidade ótima de ligante que deveria ser a mais próxima dos valores correspondentes à estabilidade e densidade aparente máximas, além dos outros parâmetros como percentagem de vazios, relação betume/vazios, estabilidade e fluência terem tido seus valores modificados para a nova realidade (AMARAL, 2000).

Segundo HILLS<sup>1</sup> (1973), apud (AMARAL, 2000), uma das propriedades mais importantes de uma mistura asfáltica é a sua estabilidade, ou seja, sua habilidade em resistir à deformação permanente quando sujeita à passagem de veículos ou mesmo quando sujeita aos veículos estacionados. Entretanto, testes laboratoriais como, por exemplo, o ensaio Marshall, para concretos asfálticos, idealizados para medir a estabilidade dessas misturas, são empíricos em sua essência. Assim, a sua utilização para prever o desempenho de revestimentos betuminosos de

---

<sup>1</sup> HILLS, J. F. **The creep of asphalt mixes.** *Journal of the institute of Petroleum*, v59, n570, 1973. p. 247-262

pavimentos rodoviários em serviço possui limitações, devendo o mesmo ser mais investigado para a finalidade pretendida.

Durante a década de 80, várias rodovias americanas de tráfego pesado passaram a evidenciar deformações permanentes prematuras, que foram atribuídas ao excesso de ligante nas misturas. Muitos engenheiros acreditavam que o impacto na compactação das misturas durante a dosagem Marshall produziam corpos-de-prova com densidades que não condiziam com as densidades dos pavimentos em campo. Esse assunto foi abordado no estudo realizado nos EUA sobre materiais asfálticos, denominado *Strategic Highway Research Program* (SHRP), que resultou em um novo procedimento de dosagem denominado Superpave (VASCONCELOS, 2004).

COELHO (1992) apresenta várias considerações sobre o método Marshall. Uma delas, reporta-se sobre a sua natureza empírica; há necessidade de o mesmo ser continuamente alimentado pelos resultados de laboratório, a fim de que seja atualizada as correlações entre os resultados de laboratório e os de desempenho das misturas nas pistas; as cargas do tráfego e as modalidades dos veículos se alteram de acordo com o crescimento sócio-econômico das regiões.

Os parâmetros de dosagem Marshall de uma mistura asfáltica empregados no método Marshall são os que seguem:

$$D_t = \frac{100}{\frac{\%b}{D_b} + \frac{\%a}{D_{rm}}} \quad (2.1)$$

$$D_{rm} = \frac{100}{\frac{\%ag}{D_{rag}} + \frac{\%am}{D_{ram}} + \frac{\%f}{D_{rf}}} \quad (2.2)$$

$$V_v(\%) = 100 \left( 1 - \frac{D_a}{D_t} \right) \quad (2.3)$$

$$VAM = V_v + VCB \quad (2.4)$$

$$VCB = \frac{D_a \times \%b}{D_b} \quad (2.5)$$

$$RBV = 100 \left( \frac{VCB}{VAM} \right) \quad (2.6)$$

em que:

- $D_a$ : densidade aparente da mistura;
- $D_t$ : densidade de massa teórica máxima;
- $V_v$ : volume de vazios;
- $D_{rm}$ : densidade real de massa média dos grãos ou fragmentos;
- $\%ag$ ,  $\%am$ ,  $\%f$ : porcentagens de agregado graúdo, miúdo e filer, respectivamente, de acordo com a granulometria adotada e as definições de agregados da NBR 7225 da ABNT;
- $D_{rag}$ ,  $D_{ram}$ ,  $D_{rf}$ : densidade real da massa dos grãos de agregado graúdo, agregado miúdo e filer;
- VAM: volume de vazios no agregado mineral;
- VCB: vazios com betume;
- $\%b$ : porcentagem de material betuminoso empregado, expressa em relação à massa total da mistura;
- $D_b$ : densidade de massa do material betuminoso empregado (NBR 6296 da ABNT);
- RBV: relação betume vazios;
- $\%a$ : porcentagem de agregado empregado, expressa em relação à massa total da mistura.

SOARES et al. (2000) apresentam um estudo para a determinação do teor ótimo de CAP em misturas asfálticas baseado no volume de vazios ( $V_v$ ) e na relação betume vazios (RBV). Nesta investigação, consideram que o indicador de desempenho da mistura asfáltica vazios no agregado mineral (VAM), para uma determinada granulometria e para uma determinada energia de compactação, é aproximadamente constante. Ressaltam ainda que a eficácia do método depende da variação do VAM com o teor de CAP. Para vários casos analisados, esta variação foi de aproximadamente 1%. Assim, justificou-se assumir o VAM como constante para uma determinada granulometria e energia de compactação. Concluem através deste estudo

sobre a necessidade de se explorar melhor a granulometria dos agregados; também, dosar cada mistura em função do CAP disponível e da estrutura na qual será empregada.

### **b – Ensaio de Tração por Compressão Diametral**

Segundo PINTO e PREUSSLER (1980), o ensaio de tração indireta ou compressão diametral, conhecido como “ensaio brasileiro”, foi desenvolvido por Lobo Carneiro e Barcellos no Brasil e independentemente por Akazawa no Japão, para determinar a resistência à tração de corpos-de-prova de concreto de cimento, através de solicitação estática.

Normalizado pelo DNER sob a designação DNER ME 138/94, o referido ensaio baseia-se na aplicação de uma carga de ruptura verticalmente em dois frisos metálicos dispostos na direção longitudinal do corpo-de-prova da mistura compactada. Ver Figura 2.3. A partir deste esforço de compressão diametral, o corpo-de-prova rompe por tração. A fórmula para cálculo da resistência à tração é a seguinte:

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad (2.7)$$

em que:

$\sigma_R$  = resistência à tração (kgf/cm<sup>2</sup>),

F = carga de ruptura (kgf),

D = diâmetro do corpo-de-prova (cm),

H = altura do corpo-de-prova (cm).

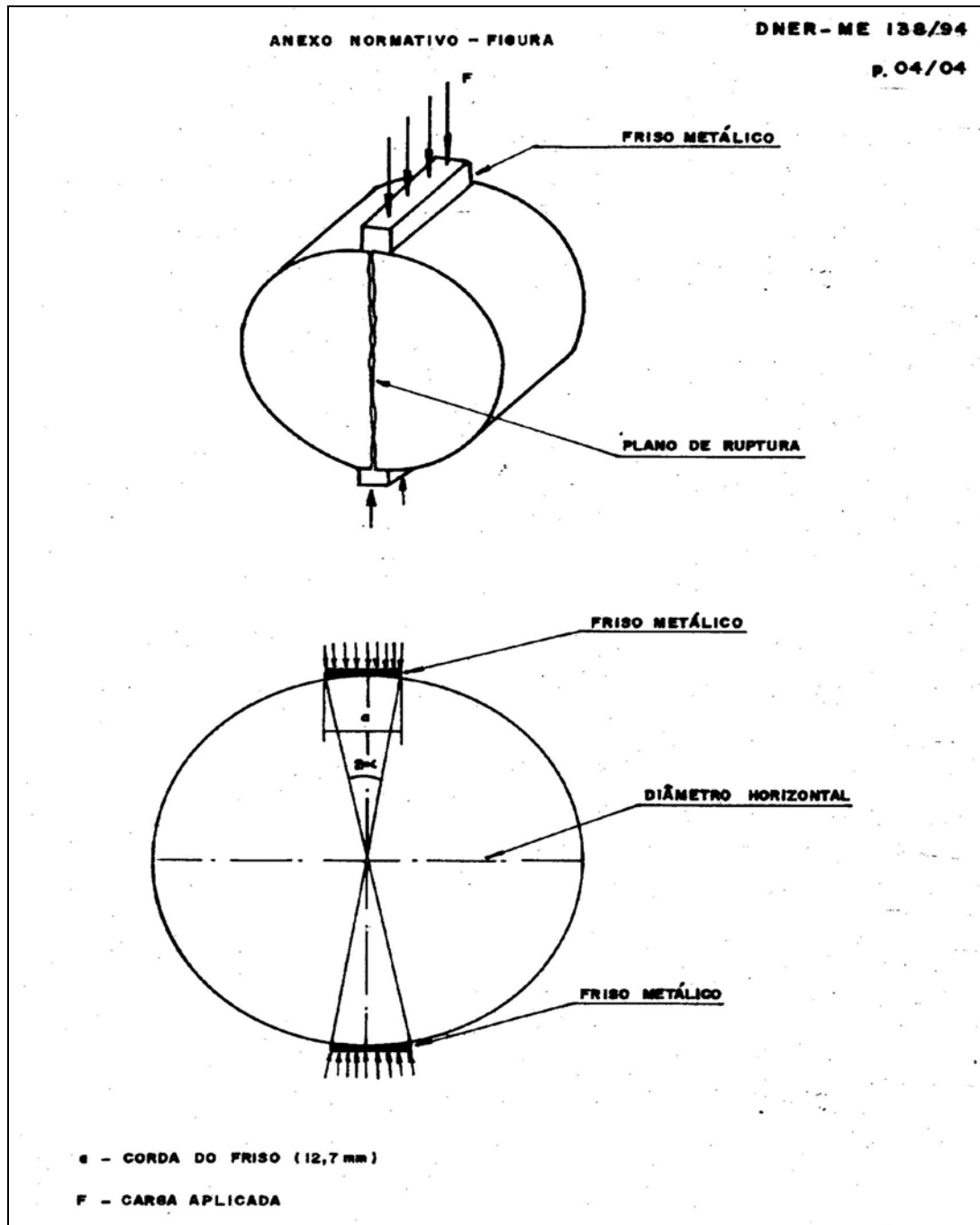


Figura 2.3: Ensaio de compressão diametral (Fonte: DNER - ME 138/94)

### c) Ensaio de módulo de resiliência

Para melhor compreender o comportamento mecânico de uma mistura asfáltica um parâmetro de rigidez muito utilizado é o módulo de resiliência. Para misturas betuminosas, é a relação entre a tensão de tração ( $\sigma_t$ ) aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a deformação específica recuperável ( $\epsilon_t$ )

correspondente à tensão aplicada, numa dada temperatura (T) (DNER-ME 133/94). A fórmula utilizada para o cálculo do módulo de resiliência é a seguinte:

$$M_R = \frac{F}{\Delta H} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (2.8)$$

em que:

$M_R$  = módulo de resiliência (kgf/cm<sup>2</sup>),

$F$  = carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo-de-prova (kgf),

$\Delta$  = deslocamento elástico ou resiliente (cm) registrado no oscilógrafo, para 300, 400 e 500 aplicações da carga (F),

$H$  = altura do corpo-de-prova (cm),

$\mu$  = coeficiente de Poisson.

A Figura 2.4 ilustra uma amostra cilíndrica, solicitada repetidamente por uma carga  $F$  de compressão, distribuída ao longo de duas geratrizes opostas. A deformação resiliente é medida através de LVDTs (*linear variable differential transducers*) posicionados horizontalmente, ao longo do diâmetro horizontal, perpendicular à carga  $F$ .

De acordo com ASTM *Designation: D 4123-82 (reapproved 1995)*, o ensaio de tração indireta com aplicação de cargas repetidas possibilita determinar os módulos de resiliência de misturas betuminosas, tanto para amostras extraídas de campo quanto para aquelas preparadas em laboratório. Neste ensaio, as amostras são submetidas a vários níveis de tensão com variações de frequência e duração de carga. Também, são empregados três valores de temperatura, isto é, 5°C, 25°C e 40°C. Dependendo da frequência do carregamento (0,33Hz; 0,5Hz e 1 Hz) e da temperatura do ensaio, o número de aplicações de carga deverá situar-se na faixa de 50 a 200 repetições. A amplitude da carga aplicada deverá enquadrar no intervalo de 10% a 50% da resistência à tração por compressão diametral.

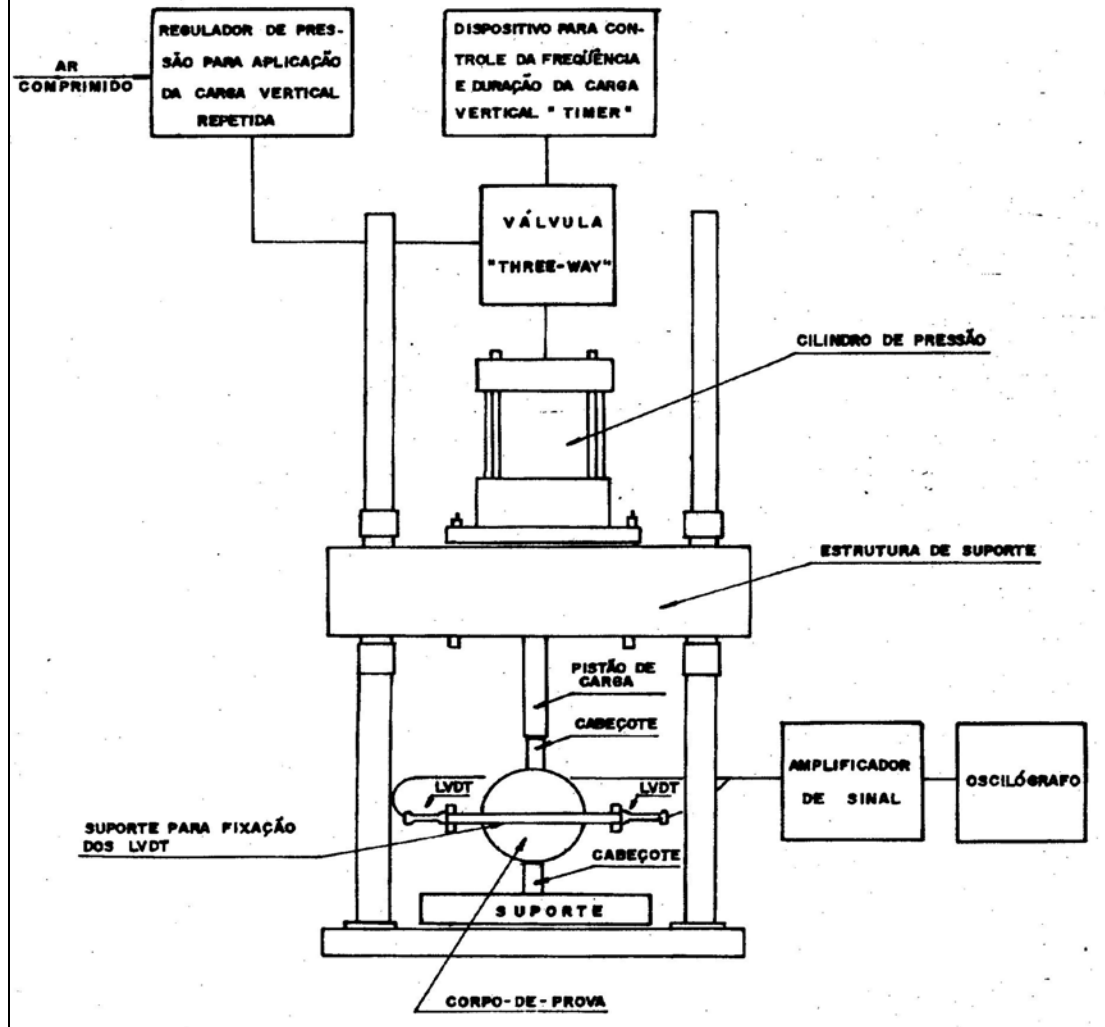


Figura 2.4: Esquema de equipamento para ensaio de compressão diametral de carga repetida (Fonte: DNER - ME 133/94)

Os módulos de resiliência e coeficientes de Poisson são obtidos pelas expressões:

$$E_{RI} = P(v_{RI} + 0,27) / t\Delta H_I \quad (2.9)$$

$$E_{RT} = P(v_{RT} + 0,27) / t\Delta H_T \quad (2.10)$$



$$v_{RI} = \frac{3,59\Delta H_I}{\Delta V_I} - 0,27 \quad (2.11)$$

$$v_{RT} = \frac{3,59\Delta H_T}{\Delta V_T} - 0,27 \quad (2.12)$$

em que:

$E_{RI}$ : módulo de resiliência instantâneo (psi ou MPa),

$E_{RT}$ : módulo de resiliência total (psi ou MPa),

$v_{RI}$ : coeficiente de Poisson resiliente instantânea,

$v_{RT}$ : coeficiente de Poisson resiliente total,

$P$ : carga repetida (lbf ou N),

$t$ : espessura da amostra (in),

$\Delta H_I$ : deformação horizontal recuperável instantânea (in ou mm),

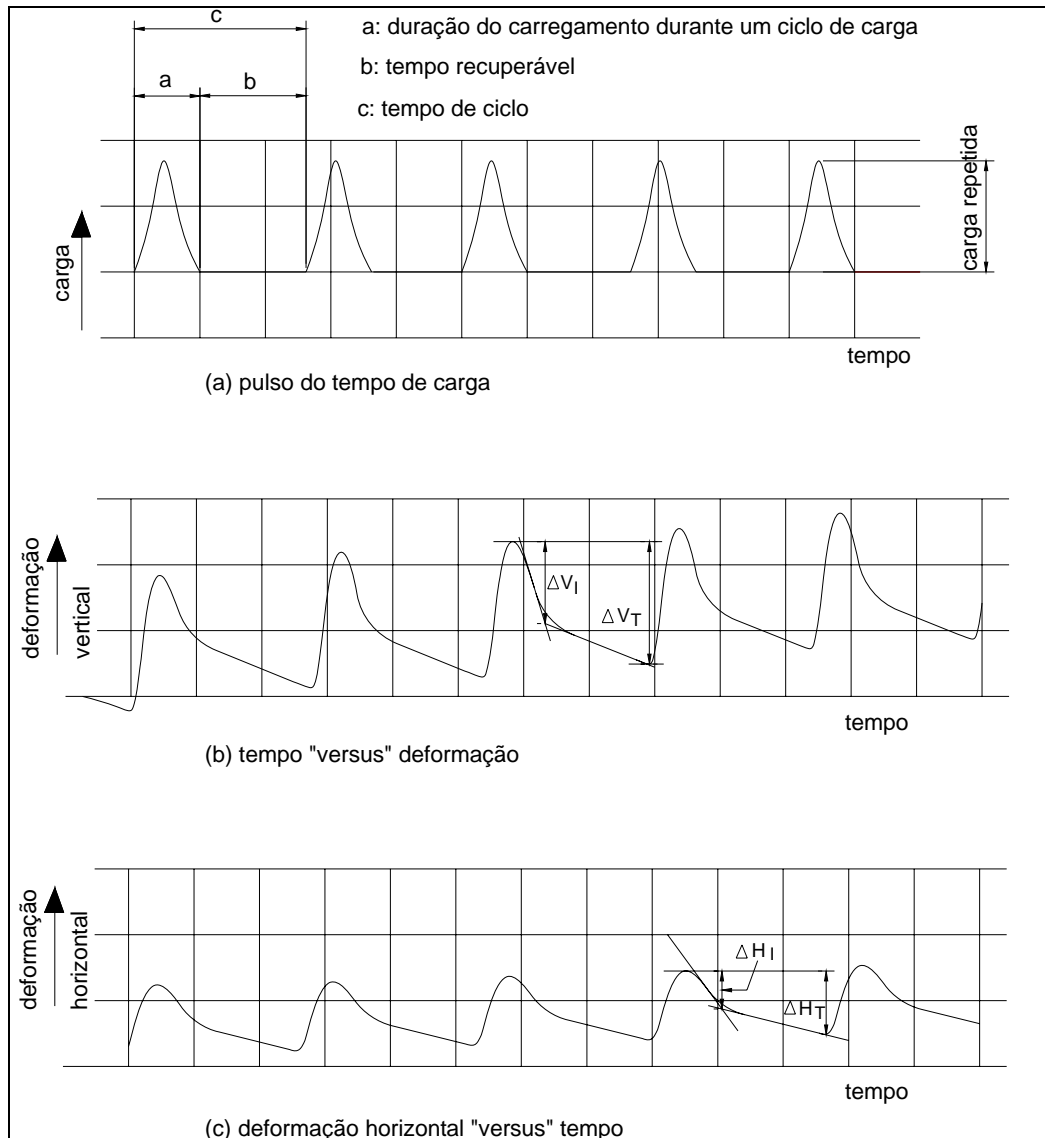
$\Delta H_T$ : deformação horizontal recuperável total (in ou mm),

$\Delta V_I$ : deformação vertical recuperável instantânea (in ou mm) e

$\Delta V_T$ : deformação vertical recuperável total (in ou mm).

Se o coeficiente de Poisson for adotado, as deformações verticais não são exigidas. A Figura 2.5 ilustra a medida da média das deformações horizontais e verticais referentes aos últimos cinco ciclos de carregamento, após a deformação resiliente repetida se tornar estável.

Segundo SILVA (1998), misturas rígidas com elevados módulos de resiliência, sob uma base elástica, estão sujeitas a tensões de flexões, responsáveis pelas deformações elásticas que, repetidas, provocam o trincamento por fadiga do revestimento. Por outro lado, pavimentos flexíveis, com baixo módulo de resiliência, são susceptíveis às deformações plásticas ou permanentes que acumuladas ao longo do tempo, provocam os afundamentos das trilhas-de-roda. Assim, a resposta estrutural de um pavimento em serviço está diretamente relacionada com a amplitude do módulo de resiliência do revestimento e das camadas a ele subjacentes.



**Figura 2.5: Tipos de deformações e formas de carregamento "versus" tempo para ensaio de tração indireta de cargas repetidas (ASTM Designation: D 4123-82 (reapproved 1995))**

MARQUES (2004) utilizou o módulo de resiliência como critério de dosagem de misturas asfálticas. Vários fatores foram investigados na sua pesquisa, quais sejam: granulometria dos agregados, teor de vazios, temperatura, tipo de ligante e método de compactação. Dentro da amplitude do seu experimento, verificou-se que foi possível inserir o valor do módulo de resiliência como critério definidor do teor de ligante asfáltico das misturas estudadas para utilização em dosagens preliminares.

#### **d) Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas**

O ensaio triaxial de cargas repetidas foi introduzido nos estudos de pavimentação pelo Prof. H. Bolton Seed na década de 50 na Universidade da Califórnia, Berkeley, quando da investigação da deformabilidade do solo do subleito da pista experimental da AASHO (MEDINA, 1997).

Ainda, segundo MEDINA (1997), a solitação dinâmica nos pavimentos e no subleito, sujeitos à cargas de diferentes intensidades e freqüências variáveis em função do tempo, é de simulação difícil, mas os ensaios de carga repetida em que a força aplicada atua sempre no mesmo sentido de compressão, de zero a um máximo e depois diminui até anular-se, ou atingir um patamar inferior, para atuar novamente após pequeno intervalo de repouso, procuram reproduzir as condições de campo.

Através do ensaio triaxial de cargas repetidas pode-se determinar a deformação permanente e também o módulo de resiliência. Uma abordagem sobre o módulo de resiliência já foi vista no item anterior. A deformação permanente é a parcela irreversível da deformação total de um material, quando submetido a certas condições de carregamento. Dependendo do material analisado e de sua função na estrutura, a freqüência, a duração do carregamento e a temperatura do ensaio são variáveis importantes a serem investigadas. O acúmulo da deformação permanente, oriundo da contribuição dos materiais que compõem as camadas do pavimento e do subleito produz os afundamentos de trilhas de rodas na superfície da via nos locais onde as rodas dos veículos transitam, principalmente os comerciais. Esses afundamentos são indesejáveis e dependendo de suas amplitudes afetam consideravelmente o conforto e a segurança dos usuários.

MAMLOUK e SAROFIM (1988) realizaram um estudo comparativo entre módulos de resiliência de misturas asfálticas obtidos pelo método triaxial e método diametral. Observam nesta pesquisa, que o método triaxial é mais representativo das condições de campo, devido à natureza triaxial da carga. Os motivos que levaram a tal afirmação foram os seguintes: o concreto asfáltico reduz a sua consistência a altas temperaturas; nesta situação, o módulo de resiliência será significativamente influenciado pela amplitude da pressão confinante. O outro motivo é que elevadas tensões de

tração são desenvolvidas na amostra, quando submetida ao ensaio de compressão diametral para a determinação do módulo de resiliência.

O tempo de aplicação de carga simula a velocidade de translação dos eixos dos veículos no campo, enquanto a frequência reproduz o número de eixos que passam em determinada seção de rodovia (SOUZA, 1997).

Segundo MEDINA e MOTTA (2005), não se têm ainda um método padronizado no Brasil para a determinação da deformação permanente, mas estudos em diversos tipos de misturas asfálticas têm sido realizado nas universidades brasileiras. A exemplo dessas considerações, pode-se recorrer aos trabalhos de JUVÊNCIO (2001) e SANTOS (2002), que determinaram a deformação permanente de misturas betuminosas a frio.

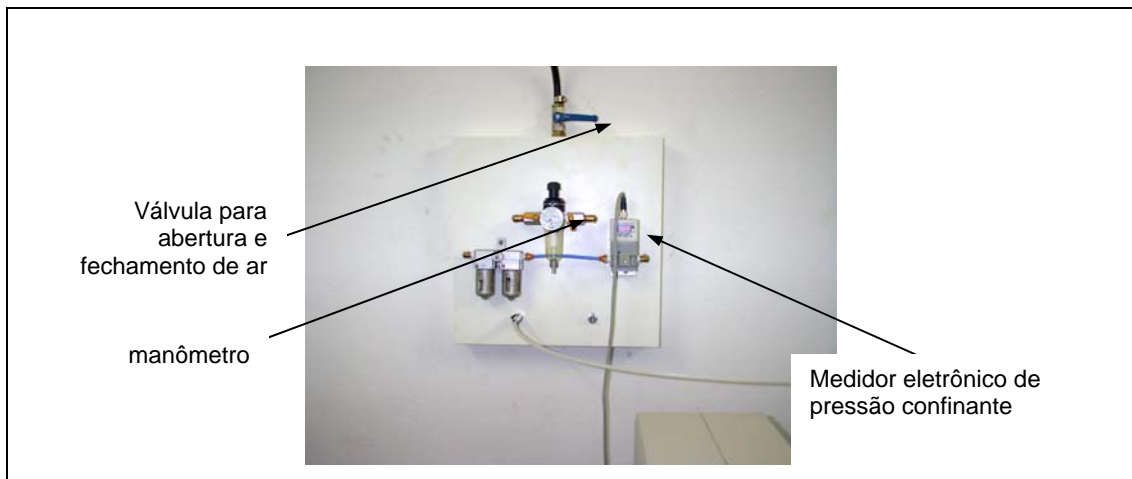
Para CARVALHO (1997), as deformações permanentes têm como causas principais: a deficiência de suporte do subleito e das camadas do pavimento, a inadequação da dosagem da mistura betuminosa e a ineficiência ou ausência dos dispositivos de drenagem da estrada.

Segundo SILVA (1998), a deformação permanente de uma mistura betuminosa está intimamente ligada à sua composição (ligante e agregado). O fenômeno de fluência (*creep*) depende da duração e da amplitude do carregamento, sendo um dos parâmetros mais importantes do comportamento de uma mistura asfáltica. A frequência e o número de repetições da carga são condicionantes do carregamento que precisam ser investigados. Entretanto, pela natureza do material empregado, destaca-se, também, a temperatura, como sendo fator de fundamental importância.

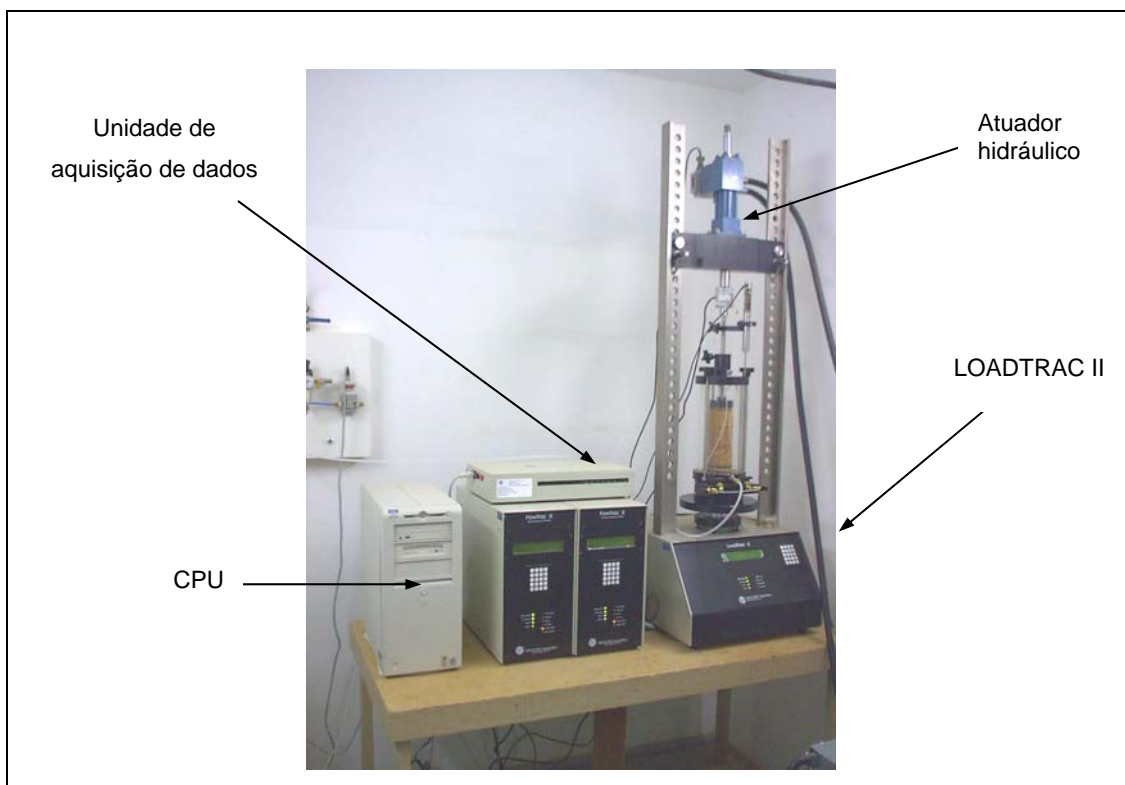
De acordo com MEDINA (1997), se teores de betume crescentes melhoram a vida de fadiga e o desgaste superficial, torna-se necessário considerar a deformação permanente que, ao contrário, aumenta com o teor de betume. O balanço necessário é de difícil determinação.

As Figuras 2.6, 2.7 e 2.8 ilustram o sistema triaxial de cargas repetidas do Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil – UFV que foi empregado para o estudo das deformações permanentes das misturas betuminosas utilizadas nesta pesquisa. Adquiriu-se este sistema da Geocomp Corporation, Boxborough – MA, USA, em julho de 2001, através do projeto de pesquisa financiado pela FAPEMIG, sob a referência TEC

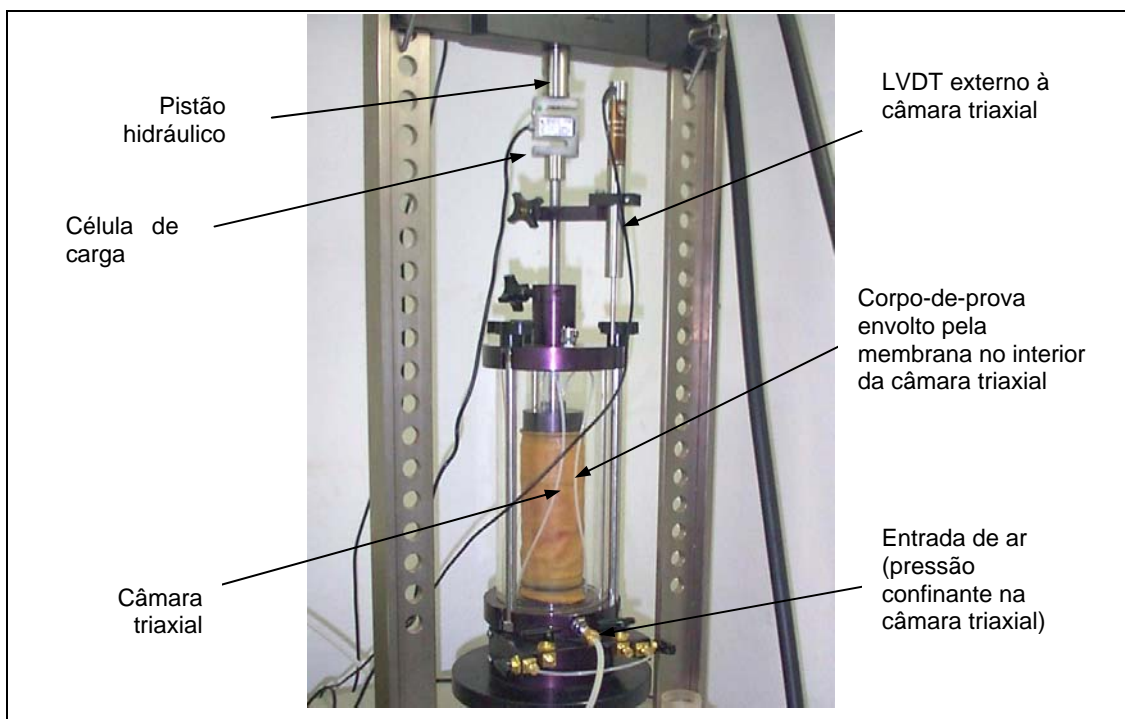
2431/97. O sistema, denominado pelo fabricante de Control and Report Software (Windows NT) for Fully Automated RM Tests on LoadTrac II System, é totalmente automatizado. Em síntese, o sistema consiste de um suporte do LoadTrac II, um atuador hidráulico, uma “servo valve” com um cilindro hidráulico, um controlador externo de condicionamento da amostra e um computador com um sistema de controle e aquisição de dados. Um regulador de pressão da célula eletro-pneumático aplica e ajusta as pressões especificadas na câmara triaxial automaticamente de um passo para outro.



**Figura 2.6: Painel de controle de pressão confinante na câmara triaxial**



**Figura 2.7: Vista do equipamento triaxial de cargas repetidas do Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil – UFV.**



**Figura 2.8: Câmara triaxial e sistema de aplicação de cargas**

### e) Fadiga de Misturas Asfálticas

Pavimentos podem apresentar problemas prematuros para níveis de tensão inferiores à resistência estática de seus materiais constituintes, ou seja, até mesmo para níveis de tensão no regime elástico. Em geral, essas situações podem ser observadas quando revestimentos betuminosos e camadas de bases cimentadas estão assentes sobre camadas que possuem deficiência de suporte, causando a ruptura do pavimento por fadiga. A fadiga é um fenômeno de trincamento induzido por cargas repetidas, em que a ruptura do material é alcançada para níveis de tensão ou deformação inferiores ao da tensão ou deformação correspondente à sua resistência (Yoder e Witczak, 1975).

Segundo MOURÃO (2003), é possível dividir o comportamento estrutural dos materiais de pavimentação sob carregamento dinâmico em duas parcelas: **(a)** a flexão repetida que leva à fadiga dos materiais e em consequência o seu trincamento e **(b)** a compressão simples que repetidamente leva à deformação permanente; como consequência surgem os afundamentos de trilha de roda.

Para GONÇALVES (1999), o principal mecanismo de ruptura de pavimentos flexíveis no Brasil é a fadiga, já que as deformações permanentes são de menor importância devido às características lateríticas dos materiais que compõem boa parte dos subleitos e camadas terrosas do próprio pavimento; acrescentando o fato de que a umidade de equilíbrio do subleito fica próxima e, geralmente, aquém do teor ótimo de umidade do ensaio de compactação normal, nos pavimentos de rodovias federais. Além disso, não ocorre a condição de saturação que é típica do degelo da primavera nos países de clima frio.

Para MEDINA (1997), o fenômeno da fadiga inicia-se através de trincas, geralmente na parte inferior do revestimento, que se propagam para cima até atingir a superfície. Em revestimentos muito espessos, de 20 cm ou mais, podem iniciar-se trincas na superfície pela curvatura convexa próximo às rodas.

A vida de fadiga das misturas asfálticas é influenciada por vários fatores, dentre os quais, pode-se destacar segundo BERNUCCI et al<sup>2</sup> (2002) (apud MORILHA JUNIOR, 2004):

- falta de compactação do subleito e/ou das camadas constituintes do pavimento, provocando um enfraquecimento da estrutura como um todo e fissuração precoce do revestimento;
- drenagem ineficiente, permitindo queda de resistência nas camadas afetadas pelo aumento de umidade;
- incompatibilidade no projeto quanto à natureza e à espessura das camadas, principalmente da camada de revestimento asfáltico em relação às demais, sendo a primeira construída com pequena espessura e alta rigidez, frente à deformabilidade das demais camadas do pavimento decorrentes das solicitações de tráfego, provocando por, conseguinte, elevadas deformações no revestimento asfáltico e, conseqüentemente, levando-o à ruptura;
- revestimentos asfálticos executados com teores de ligante abaixo do teor de projeto;
- projeto inadequado de dosagem da mistura asfáltica, levando à porcentagem de vazios que permite a entrada de água, mas não suficientemente permeável para facilitar sua saída, provocando um aumento da pressão neutra na água presa dentro dos vazios, diminuindo a resistência do material e;
- temperatura de usinagem ou de execução do revestimento asfáltico impróprias, entre outros fatores.

A estimativa da vida de fadiga de misturas asfálticas pode ser feita de duas maneiras segundo PINTO & MOTA<sup>3</sup> (1995), citado por BEZERRA NETO (2004): (a) por meio de ensaios de placa ou pistas de simulação de tráfego que se aproximem bastante das condições de um pavimento real e (b) através de ensaios de laboratório com corpos-de-prova submetidos a níveis de tensões de modo a simular as condições de solicitações no campo.

---

<sup>2</sup> BERNUCCI, L. B. et al **Propriedades Mecânicas em Laboratório de Misturas Asfálticas convencionais e Modificadas por Polímeros**. 16º Encontro de Asfalto, IBP, Rio de Janeiro-RJ, 2002.

<sup>3</sup> PINTO, S.; MOTTA, L. M. G. **Catálogo de curvas de fadiga**. Associação Brasileira de Pavimentação. Boletim Técnico nº16. 1995.



PINTO e PREUSSLER (2001) citam vários tipos de ensaio que podem ser utilizados para estudos de fadiga em misturas betuminosas, quais sejam: flexão, rotação, tração direta, tração indireta e flexão em balanço. Devido à simulação da aplicação de esforços, MEDINA (1997) aponta a preferência dos ensaios de flexão. Entretanto, no Brasil, o ensaio de compressão diametral sob carga repetida tem se firmado como opção preferencial pela simplicidade de execução, facilidade de moldagem dos corpos-de-prova em laboratório segundo o método Marshall, pela variabilidade relativamente baixa dos resultados em relação a outros ensaios e por simular bem as condições de campo.

PINTO e PRESUSLER (2001) comentam que o ensaio de fadiga à compressão diametral em corpos-de-prova cilíndricos (63 mm de altura x 100 mm de diâmetro) é feito à tensão controlada, onde as cargas verticais devem induzir tensões de tração horizontais no centro da amostra entre 10% e 50% da resistência estática calculada pela Equação 2.7. A temperatura que em geral se utiliza no ensaio é  $25^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ .

Os equipamentos laboratoriais para ensaios de carga repetida permitem a aplicação de carregamentos cíclicos ao material sob regime de tensão constante ou controlada e de deformação constante ou controlada. De acordo com PINTO e PRESUSLER (2001), no ensaio de tensão controlada (TC), a tensão é mantida constante ao longo do ensaio e as deformações resultantes aumentam no decorrer do ensaio em função de N (número de aplicações de tensão). Já no ensaio de deformação controlada (DC), para que a deformação seja mantida constante ao longo do ensaio, é necessário que haja uma diminuição no carregamento aplicado. Alguns autores definem a vida de fadiga à deformação controlada como o número de repetições de carga capaz de reduzir a rigidez inicial da amostra a um nível pré-estabelecido (redução da ordem de 50 %). Também, o fim do ensaio à deformação controlada pode ser atingido quando a carga aplicada para manter a deformação é reduzida de 40% a 50% da carga inicial. Os referidos autores comentaram ainda que o emprego dos ensaios de fadiga à tensão ou deformação controlada depende tanto da espessura e do módulo de rigidez do revestimento, quanto do módulo da estrutura subjacente.

Segundo MEDINA (1997), a solicitação a tensão controlada é a que ocorre em pavimento de revestimento asfáltico bem mais rígido do que a camada de base e que ao resistirem às cargas determinam a magnitude das deformações. A solicitação à deformação controlada corresponde melhor a pavimentos de revestimento delgado e fraco em relação à base; embora adicionando alguma resistência, o revestimento tem sua deformação controlada pela das camadas subjacentes.

De acordo com MORILHA JUNIOR (2004), na verdade, estes dois tipos de solicitação representam os tipos extremos de carregamento possível no campo, sendo o que realmente ocorre, é um tipo intermediário de solicitação. Assim, além de outras aproximações que devem ser feitas em laboratório, é necessário a introdução de um fator campo-laboratório para ajustar a vida de fadiga de laboratório de uma mistura asfáltica e a vida útil real do pavimento.

Em qualquer das formas de ensaio, a ruptura por fadiga expressa pelo número N de solicitações necessárias para o fim do ensaio, é relacionada à tensão de tração ( $\sigma_t$ ) aplicada ou a deformação de tração inicial ( $\varepsilon_t$ ), por meio de modelos representados pelas equações a seguir:

$$N = k \left( \frac{1}{\sigma_t} \right)^n \quad (2.13)$$

$$N = k \left( \frac{1}{\varepsilon_t} \right)^n \quad (2.14)$$

Em que:

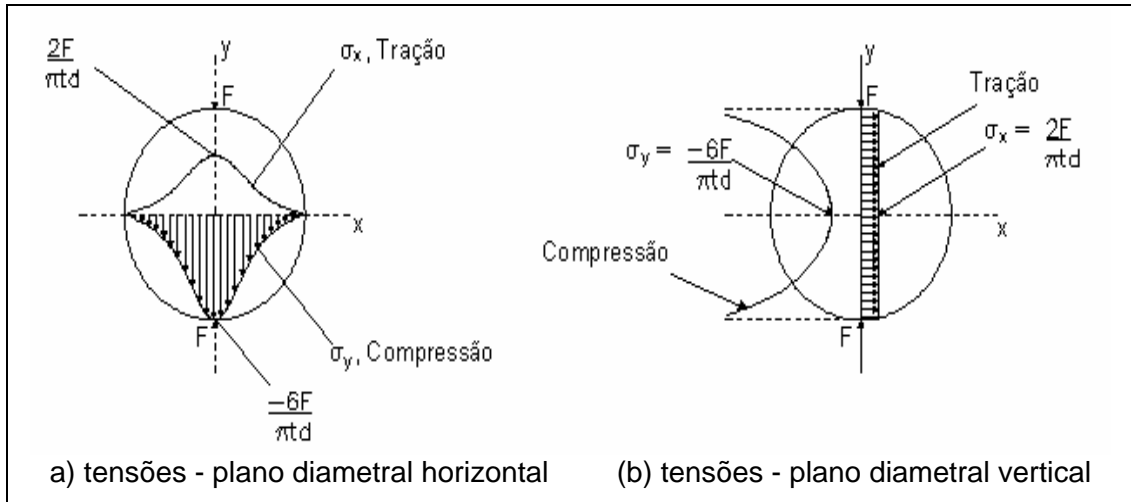
N é o número de repetições de carga necessária à ruptura do corpo-de-prova;

$\sigma_t$  é a tensão de tração aplicada;

$\varepsilon_t$  é a deformação específica de tração e

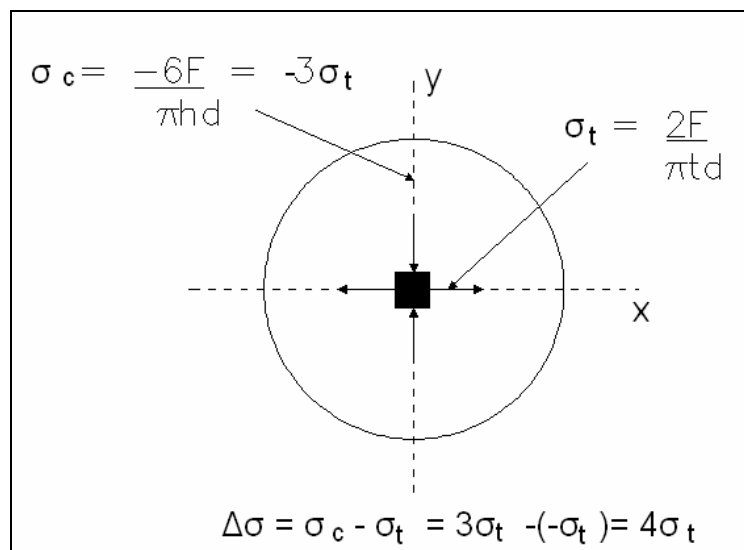
k e n são parâmetros obtidos experimentalmente.

Tem se modelado os resultados dos ensaios de fadiga em termos da deformação específica resiliente e da diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ ). A Figura 2.9 ilustra a distribuição das tensões de tração e compressão nos planos diametrais: (a) plano diametral horizontal e (b) plano diametral vertical.



**Figura 2.9: Distribuição das tensões de tração e compressão nos planos diametrais (FONTE: MEDINA e MOTTA (2005))**

A Figura 2.10 ilustra a variação das tensões ( $\Delta\sigma$ ) de compressão ( $\sigma_c$ ) e de tração ( $\sigma_t$ ) no centro do corpo-de-prova. Sendo: F a carga vertical de compressão aplicada repetidamente; t e d a altura e diâmetro do corpo-de-prova, respectivamente.



**Figura 2.10: Variação das tensões ( $\Delta\sigma$ ) de compressão ( $\sigma_c$ ) e de tração ( $\sigma_t$ ) no centro do corpo-de-prova (PINTO e PREUSSLER, 2001).**

O Quadro 2.4 contém informações sobre as características mecânicas e de fadiga à tensão controlada de vários tipos de misturas betuminosas, sendo:  $M_R$  – módulo de resiliência;  $S$  – desvio padrão;  $\Delta\sigma$  - diferença de tensões horizontal e vertical no ensaio e  $\sigma_{tr}$  – resistência à tração indireta por compressão diametral.

**Quadro 2.4: Informações sobre características mecânicas e de fadiga à tensão controlada de misturas asfálticas.**

AM	CAP	Petróleo	$M_R$ (MPa)	$S$ (MPa)	$\sigma_{tr}$ (MPa)	$S$ (MPa)	$N = k_1 \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_1}$		
							$K_1$	$n_1$	$r^2$
1	50/60	Bachaquero	3920	270	0,63	0,04	$1,2 \times 10^3$	2,77	0,97
2	50/60	Mistura	4020	330	0,62	0,03	$1,97 \times 10^3$	2,86	0,96
3	30/45	Árabe Leve	5950	390	1,04	-	$5,63 \times 10^3$	2,65	0,99
4	20/45	Árabe Leve	14300	1950	1,87	0,05	$5,32 \times 10^4$	2,88	0,94
5	55	Mistura	5140	410	1,06	0,10	$3,59 \times 10^3$	2,32	0,97
6	20	Mistura	3520	290	0,81	0,05	$1,31 \times 10^3$	2,61	0,98

Fonte: PINTO e PRESSLER (2001)

### 3 – MATERIAIS E MÉTODO

Neste tópico, apresenta-se uma abordagem sobre os materiais utilizados nesta pesquisa, suas caracterizações e os métodos e equipamentos empregados no desenvolvimento deste trabalho, para atendimento dos seus objetivos.

#### 3.1 – Materiais

A investigação, em laboratório, do comportamento mecânico das misturas betuminosas a frio e a quente foi realizada empregando-se vários materiais, conforme a seguir apresentado.

##### 3.1.1 – Agregados:

- **Agregados graúdos** (brita 1 e brita 0): de formação gnáissica, oriundos da Pedreira de Ervália, localizada na cidade de Ervália - MG.

- **Agregados miúdos**: sob a denominação de pó-de-pedra e apresentam a mesma formação mineralógica dos agregados graúdos. São provenientes da pedreira anteriormente citada.

A preferência por esses agregados se deve ao elevado emprego dos mesmos em obras de engenharia na cidade de Viçosa-MG e microrregião, tanto na construção civil, quanto na pavimentação de vias. Neste estudo não

se abrangeu coleta de agregados, pelo fato de se dispor de grande quantidade desses materiais estocados no Laboratório de Asfalto do Departamento de Engenharia Civil – UFV, devidamente caracterizados como mostrados no Quadro 3.1.

**Quadro 3.1: Caracterização dos agregados: abrasão “Los Angeles”, índice de forma, massa específica e material pulverulento.**

Características	Método	Materiais		
		Pó-de-pedra	Brita 0	Brita 1
Abrasão “Los Angeles” (%)	DNER – ME 035/94	-	-	47
Índice de forma	DNER – ME 086/94	-	-	2,50
Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	NBR 9937 (ABNT, 1986)	27,753	27,164	27,361
Material pulverulento (%)	NBR 7219 (ABNT, 1986)	17,8	1,8	0,35

Fonte: CARVALHO et al. (2002)

O valor, em porcentagem, da abrasão “Los Angeles” fornece uma idéia da qualidade do material pétreo e seu possível comportamento ao desgaste pelo atrito interno, já que este atrito é muito grande entre os agregados, durante a execução do revestimento pelos rolos compressores, ou posteriormente, no próprio pavimento construído, sob a ação do tráfego (SENÇO, 1997). Na especificação de serviço DNIT 031/2004 para concreto asfáltico, recomenda-se um desgaste “Los Angeles” igual ou inferior a 50%, valor atendido pelo agregado em estudo; já na especificação de serviço DNER 317/97 para pré-misturado a frio, recomendam-se valores igual ou inferior a 40%. O agregado empregado nesta investigação não atendeu, pois apresentou um desgaste “Los Angeles” de 47%. Na especificação anteriormente citada, admite-se o agregado no caso de empregos anteriores terem apresentado desempenho satisfatório. Assim, pelo seu alto emprego em Viçosa-MG e microrregião de forma aceitável, optou-se por sua utilização no desenvolver desta pesquisa.

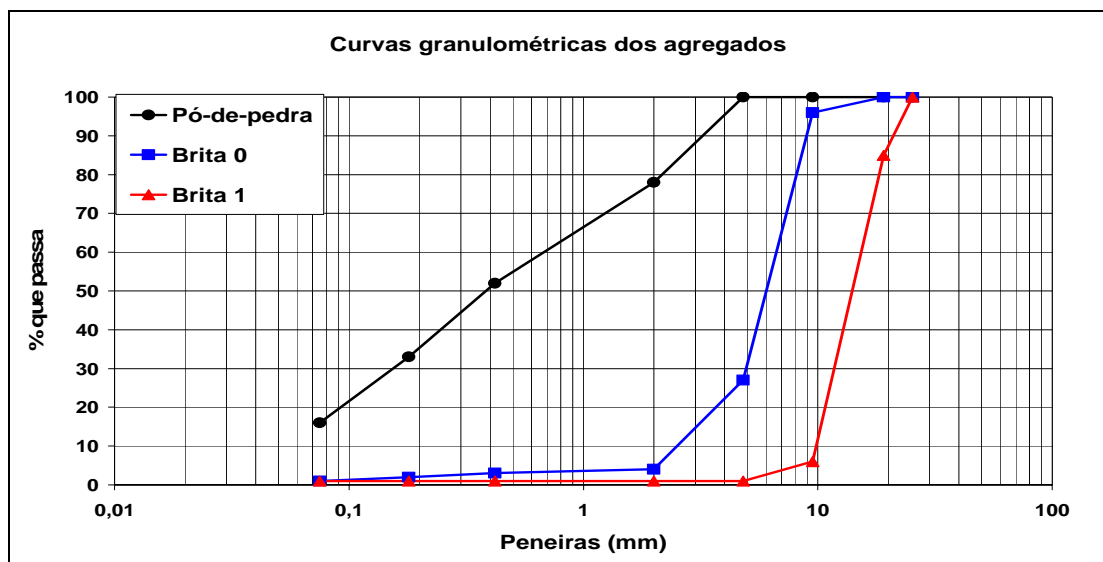
Quanto ao índice de forma, o valor superior a 0,5 atende às duas especificações citadas anteriormente.

O Quadro 3.2 contém os resultados dos ensaios de granulometria dos agregados utilizados nesta pesquisa. A Figura 3.1 ilustra as curvas granulométricas destes agregados.

**Quadro 3.2: Granulometria dos agregados.**

Peneiras		% em peso que passa		
ASTM	(mm)	Pó-de-pedra	Brita 0	Brita 1
1"	25,4	100	100	100
3/4"	19,1	100	100	85
3/8"	9,5	100	96	6
#4	4,8	100	27	1
#10	2,0	78	4	1
#40	0,42	52	3	1
#80	0,18	33	2	1
#200	0,075	16	1	1

Fonte: CARVALHO et al. (2002)



**Figura 3.1: Curvas granulométricas dos agregados.**

### **3.1.2 – Materiais Betuminosos**

Para as misturas betuminosas a frio, foram utilizados dois tipos de ligante, quais sejam: a emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta (RL-1C) e a emulsão asfáltica catiônica de ruptura média (RM-1C), provenientes da Empresa Ipiranga Asfalto S.A., localizada na cidade de Betim-MG. Para as misturas betuminosas a quente, foi empregado o cimento asfáltico de petróleo CAP 50-70; essa classificação é feita com base na penetração do cimento asfáltico. Todos esses materiais betuminosos foram doados ao Departamento de Engenharia Civil – UFV, para a realização desta pesquisa, devidamente caracterizados atendendo às exigências contidas nas suas especificações de serviço atualmente recomendadas, conforme apresentadas nos Quadros 3.3 e 3.4. Como mais uma medida de controle dos materiais betuminosos, alguns dos ensaios de caracterização foram também realizados no Laboratório de Asfalto do Departamento de Engenharia Civil – UFV, e que se encontram nos referidos quadros assinalados em negrito.



**Quadro 3.3: Especificação das emulsões asfálticas RL-1C e RM-1C.**

<b>Propriedades</b>	<b>Métodos</b>	<b>RL – 1C*</b>	<b>RM – 1C**</b>
Viscosidade Saybolt Furol a 50 °C (s)	NBR – 14491	70	20 – 200
Sedimentação, 5 dias (% em peso)	NBR – 6570	5 <b>1,8</b>	5
Peneiração (0,84mm) (% em peso)	NBR – 14393	0,1	0,1 <b>0,014</b>
Mistura com cimento (%)	NBR - 6297	2	-
Carga da partícula	NBR – 6567	positiva <b>positiva</b>	positiva <b>positiva</b>
Resíduo asfáltico por destilação (% em peso)	NBR – 6568	60,0	62,0
Desemulsibilidade (% em peso)	NBR – 6569	-	50
Ensaio sobre o solvente destilado:			
Destilação, 95% evaporados (°C)	NBR - 6568	-	360
Ensaio sobre o resíduo:			
Penetração, 100g, 5s, 25°C	NBR – 6576	50 – 250	50 – 250
Teor de betume (% em peso)	MB – 166	97	97
Ductilidade a 25°C, 5 cm/min (cm)	NBR - 6293	40	40

\* RL – 1C → emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta.

Fonte: Ipiranga Asfaltos S. A. (2005)

\*\* RM – 1C → emulsão asfáltica catiônica de ruptura média.

**Quadro 3.4: Especificação do CAP 50-70.**

<b>Propriedades</b>	<b>Métodos</b>	<b>CAP 50-70</b>
Penetração, 100g, 5s, 25°C	NBR 6576	50 – 70
Ponto de amolecimento, (°C)	NBR 6560	46
Viscosidade Saybolt-Furol a:		
135°C, (SSF)	NBR 14950	141
150°C, (SSF)		50
177°C,(SSF)		30-150
OU		
Viscosidade Brookfield a:		
135°C (cP)		274
150°C (cP)	NBR 15184	112
177°C (cP)		57-285
Índice de susceptibilidade térmica	-	(-1,5) a (+0,7)
Ductilidade a 25°C, (cm)	NBR 6293	60
Ponto de fulgor, (°C)	NBR 11341	235
Solubilidade em tricloroetileno, (% massa)	NBR 14855	99,5
RTFOT – Efeito do calor e do ar (163°C, 85 min) – Variação em massa, (%)	D 2872	0,5
Ductilidade a 25°C, (cm)	NBR 6293	20
Aumento do ponto de amolecimento, (°C)	NBR 6560	8
Penetração retida, (%)	NBR 6576	55

Fonte: Ipiranga Asfaltos S. A. (2005)

### 3.2 - Método

O método utilizado no desenvolvimento deste estudo abrangeu a composição de uma única faixa granulométrica para as misturas a frio e a quente e também a realização de ensaios que possibilitam analisar o comportamento mecânico destas misturas, quais sejam: método Marshall, ensaio de tração por compressão diametral e ensaio triaxial de carga repetida. Em resumo, as atividades empregadas compreenderam as seguintes fases:

### **Fase 1: Composição de uma faixa granulométrica para a realização das misturas a frio e a quente**

Através de inúmeras tentativas de misturas de agregados, compôs-se uma granulometria para os agregados que atendesse simultaneamente a duas faixas granulométricas de duas especificações de serviço do DNIT, quais sejam: Faixa C do DNER - ES 317/97 – Pavimentação – Pré-misturado a Frio e faixa B do DNIT 031/2004 - ES - Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico. As misturas a quente e a frio foram avaliadas através de uma mesma granulometria. Na preparação dos agregados, teve-se o cuidado de separá-los em diversas frações granulométricas para garantir maior homogeneidade das amostras.

### **Fase 2: Escolha dos teores de ligante para comporem as misturas betuminosas a frio e a quente pelo método Marshall**

Na análise do desempenho das misturas betuminosas, através do método Marshall, foram utilizados quatro traços, três amostras por traço e três tipos de ligantes, totalizando 36 corpos-de-prova.

A mistura de agregados para cada corpo-de-prova foi definida como aquela necessária para obter um corpo-de-prova com aproximadamente 6,3 cm de altura, 10,0 cm de diâmetro e 1.200 g, incluindo o ligante, conforme os métodos de ensaio do DNER ME 043/95 para misturas a quente e ME 107/94 para misturas a frio. As energias de compactação empregadas foram de 50 golpes por face dos corpos-de-prova para as misturas a frio e 75 golpes por face dos corpos-de-prova para as misturas a quente.

No método de ensaio ME 043/95 para misturas a quente, define-se que a temperatura que o ligante deve ser aquecido, para ser misturado aos agregados, é aquela na qual apresenta uma viscosidade Saybolt-Furol de  $85 \pm 10$  sSF, e para a compactação é aquela na qual o ligante apresenta uma viscosidade Saybolt-Furol de  $140 \pm 15$  sSF. Assim, as misturas a quente, empregando o CAP 50-70 nesta pesquisa, foram efetuadas com o ligante a 150°C e compactadas com temperaturas aproximadas de 135°C. Os

agregados foram aquecidos à temperaturas de aproximadamente 10°C a 15°C acima da temperatura de aquecimento do ligante.

Teve-se o cuidado de se utilizar o mesmo teor de CAP/traço, tanto nas misturas a quente quanto nas misturas a frio. O Quadro 3.5 contém os teores de emulsão e de CAP empregados nas misturas betuminosas. A escolha desses teores pode ser justificada por diversos trabalhos, como por exemplo: em SENÇO (2001), comenta-se que teores de betume na faixa de 4% a 6% conferem às misturas betuminosas maiores condições de estabilidade, resistência e pequena porcentagem de vazios. Menores porcentagens de vazios evitam o fenômeno da exsudação com a passagem do tráfego. Nessa faixa, os vazios do agregado mineral atingem valores mínimos, em torno dos quais deverá estar o teor ótimo de betume. PINTO e PREUSSLER (1980), numa investigação sobre módulos de resiliência de concretos asfálticos de diversos trechos de rodovias brasileiras, encontraram teores de betume variando na faixa de 4,3% a 6,5%.

**Quadro 3.5: Traços das misturas betuminosas utilizadas no método Marshall**

Tipo de Ligante	Traço							
	1		2		3		4	
	% CAP	% Emulsão	% CAP	% Emulsão	% CAP	% Emulsão	% CAP	% Emulsão
CAP 50-70	4,0		4,7		5,4		6,1	
RL-1C	4,0	6,5	4,7	7,6	5,4	8,7	6,1	9,8
RM -1C	4,0	6,3	4,7	7,4	5,4	8,4	6,1	9,5

**Fase 3: Ensaio Marshall com os teores de projeto e  $\pm 0,5\%$  de CAP e comparação com os resultados obtidos no método Marshall**

Após análise e interpretação dos resultados da dosagem Marshall, para as misturas betuminosas a quente (DNER - ME 043/95) e a frio (DNER - ME 107/94), definiram-se os teores de projeto de ligantes betuminosos

para as referidas misturas. Em seguida, utilizou-se o seguinte procedimento: nas misturas betuminosas a frio fez-se novamente a compactação dos corpos-de-prova pelo método Marshall empregando o teor de projeto nas energias de compactação de 50 e 75 golpes por face, para fins de comparação dos resultados dos novos valores dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas betuminosas com os encontrados anteriormente no método Marshall. Nesta etapa da pesquisa, analisou-se também a eficiência das misturas a frio com 50 e 75 golpes por face do corpo-de-prova. Para as misturas a quente, o procedimento foi o mesmo, mas empregou-se somente 75 golpes por face dos corpos-de-prova, pois na norma atual de misturas betuminosas a quente, não se recomenda mais a compactação das amostras com 50 golpes por face do corpo-de-prova. Para cada tipo de ligante betuminoso, foram ainda pesquisados mais dois traços, ou seja,  $\pm 0,5$  % de CAP em relação aos teores de projeto de cada mistura. Assim, para este ensaio, foram totalizados 45 corpos-de-prova.

#### **Fase 4: Realização do ensaio para a determinação da resistência à tração por compressão diametral**

Foram, também, avaliados os desempenhos das misturas empregando-se o seguinte ensaio: misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral – DNER-ME 138/94. As condições de ensaio das amostras neste tipo de teste foram também empregando os teores de projeto e suas proximidades, ou seja,  $\pm 0,5$  % de CAP em relação ao teor de projeto, para cada tipo de ligante utilizado na pesquisa. Resumindo têm-se: (i) para as misturas a frio: 2 tipos de ligantes (RL-1C e RM-1C), 2 energias de compactação (50 e 75 golpes), 3 teores de CAP e 3 amostras, totalizando 36 corpos-de-prova e (II) para as misturas a quente, têm-se: 1 tipo de ligante (CAP 50-70), 1 energia de compactação (75 golpes), 3 teores de CAP e 3 amostras, totalizando 9 corpos-de-prova. Os corpos-de-prova foram compactados segundo o método Marshall e ensaiados à temperatura de 30°C.

### **Fase 5: Realização do ensaio para a determinação das deformações permanentes**

Foram, também, avaliados os desempenhos das misturas betuminosas empregando-se o ensaio triaxial de cargas repetidas já citado no tópico 2 deste trabalho, item 2.4.1 – (d), página 32. A Figura 3.2 ilustra uma vista geral do equipamento utilizado para a realização deste ensaio com uma amostra de uma mistura betuminosa no interior da câmara triaxial, preparada para a realização do ensaio.



**Figura 3.2 Vista geral do equipamento triaxial de cargas repetidas do Laboratório de Geotecnia – Departamento de Engenharia Civil - UFV**

As condições de ensaio das amostras neste tipo de teste foram somente para os teores de projeto obtidos no método Marshall para cada tipo de ligante utilizado na pesquisa. Resumindo têm-se: (i) para as misturas a frio: 2 tipos de ligantes (RL-1C e RM -1C), 1 energia de compactação (75 golpes), 1 teor de CAP e 3 amostras por teor de ligante, totalizando 6 corpos-de-prova; e (II) para a mistura a quente, têm-se: 1 tipo de ligante (CAP 50-70), 1 energia de compactação (75 golpes), 1 teor de CAP e 3 amostras por teor de ligante, totalizando 3 corpos-de-prova. As dimensões

dos corpos-de-prova foram 7,2 cm de diâmetro e 15,2 cm de altura, mantendo uma relação aproximada de  $\frac{1}{2}$  entre estas duas dimensões. Os corpos-de-prova foram compactados pela aplicação de uma carga em prensa hidráulica em três camadas pré-determinadas ao longo da altura do molde objetivando alcançar o grau de compactação correspondente à do teor de projeto encontrado no método Marshall. Os passos para a realização deste ensaio foram os seguintes:

- preparação da mistura nas condições de dosagem pré-estabelecidas e compactação do corpo-de-prova na energia de compactação desejada;
- envolvimento do corpo-de-prova por uma membrana de borracha;
- verificação do alinhamento do corpo-de-prova com o cabeçote para garantir que a carga seja aplicada axialmente;
- fechamento da câmara triaxial;
- posicionamento do transdutor de deslocamento (LVDT) que fica externo à câmara triaxial e fixação do duto de injeção de ar comprimido na base da câmara triaxial para aplicação da pressão confinante;
- condicionamento da amostra: para reduzir as imperfeições de contato da amostra no interior da câmara triaxial, foram aplicados 100 ciclos de carga correspondentes a uma tensão desviadora de 50 kPa a uma pressão confinante de 25 kPa e frequência de 1 hertz. Também, elimina as deformações permanentes iniciais da mistura, mas sendo baixo o estado de tensão, as mesmas foram consideradas desprezíveis;
- Em seguida, efetivação do ensaio através da aplicação de uma pressão confinante estática (175 kPa) e de uma tensão desviadora axial cíclica (210 kPa), com uma frequência de 1 hertz e duração de carga igual a 0,1 s, até completar 10.000 aplicações dessa amplitude de carga. Essas tensões foram as mesmas utilizadas por JUVÊNCIO (2002), ao extrair as tensões normais vertical e horizontal no centro

do revestimento asfáltico, após aplicação do programa Michi-pave, em um pavimento hipotético com as seguintes dimensões: revestimento asfáltico de 10 cm, base granular de 20 cm e uma camada de reforço de 15 cm de espessura. A carga equivalente utilizada foi de 7.000 libras ou 3.175 kgf para uma pressão de enchimento do pneu de 80 psi ou 5,63 kgf/cm<sup>2</sup>. O ensaio foi conduzido à temperatura ambiente, em torno de 27°C.

Uma vez o corpo-de-prova devidamente posicionado na base da prensa e as condições do teste selecionadas, o sistema LoadTrac II possibilita realizar o ensaio do começo ao fim. Os dados do teste são gravados num arquivo e posteriormente exibidos através de um *software*.

#### **Fase 6: Realização do ensaio para a determinação da resistência à água – adesividade**

Verificou-se a resistência à água (adesividade) do asfalto residual dos ligantes betuminosos em relação ao agregado graúdo utilizado na pesquisa. Um ensaio bastante simples, realizado de acordo com o método DNER – ME 078/94: agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso.

O resultado procede-se de uma análise visual onde se indica como satisfatório quando não houver nenhum deslocamento da película betuminosa e não satisfatório quando houver total ou parcial deslocamento da película betuminosa.



## **4 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Neste tópico, são apresentados os resultados e discussões pertinentes aos métodos de ensaios de laboratório nos materiais empregados e nas misturas betuminosas efetuadas.

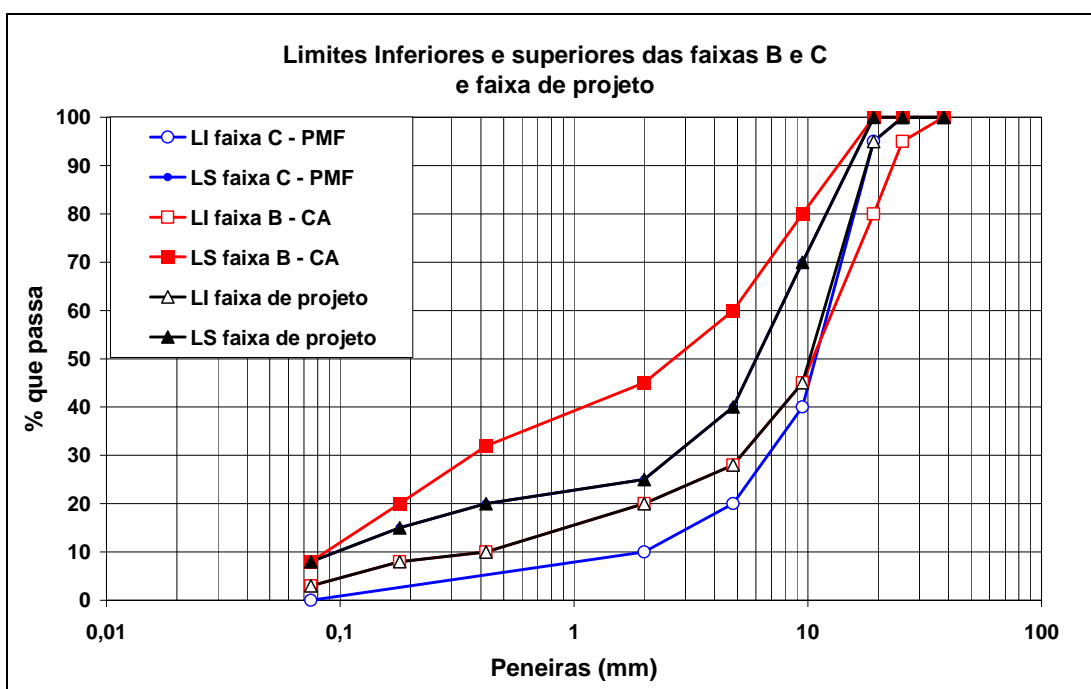
A apresentação dos resultados se faz por meio de quadros e figuras procurando proporcionar uma análise separada de cada fase empregada na metodologia de estudo.

### **4.1 – Composição de uma faixa granulométrica**

O Quadro 4.1 apresenta os limites inferiores e superiores da faixa C do DNER – ES 317/97 – Pavimentação – Pré-misturado a frio (PMF) e da faixa B do DNIT 031/2004 – ES – Pavimentos flexíveis – Concreto Asfáltico (CA); também, a composição de uma faixa que atende às duas faixas anteriormente citadas, aqui denominada faixa de projeto. A Figura 4.1 ilustra os limites inferiores e superiores destas faixas.

**Quadro 4.1: Limites inferiores (LI) e superiores (LS) das faixas granulométricas: faixa C (PMF), faixa B (CA) e faixa de projeto**

Peneiras	faixa C PMF	faixa B CA		faixa de projeto		Tolerâncias		
		LI	LS	LI	LS			
ASTM	(mm)	LI	LS	LI	LS	LI	LS	
1 1/2"	38,1	-	-	100	100	100	100	±7%
1"	25,4	100	100	95	100	100	100	±7%
3/4"	19,1	95	100	80	100	95	100	±7%
3/8"	9,5	40	70	45	80	45	70	±7%
#4	4,8	20	40	28	60	28	40	±5%
#10	2,0	10	25	20	45	20	25	±5%
#40	0,42	-	-	10	32	10	20	±5%
#80	0,18	-	-	8	20	8	15	±3%
#200	0,075	0	8	3	8	3	8	±2%



**Figura 4.1: Limites inferiores e superiores das faixas granulométricas: faixa C (PMF), faixa B (CA) e faixa de projeto.**

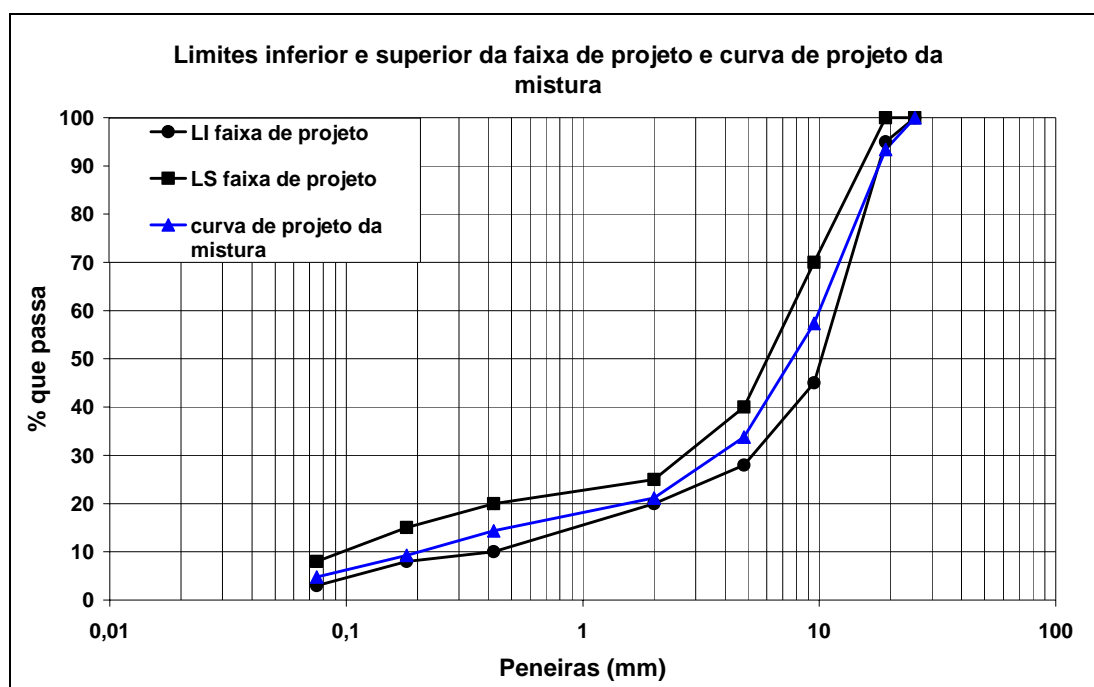
Verifica-se na Figura 4.1 que o limite superior (LS) da faixa C para PMF coincide com o limite superior (LS) da faixa de projeto.

Conhecidos os limites da faixa C (PMF) e da faixa B (CA) foi possível obter a curva de trabalho. Para este fim, empregou-se inicialmente o método de *Rothfucks*, obtendo-se uma porcentagem aproximada de cada material a

ser utilizado na mistura. A partir desses valores, efetuaram-se inúmeras tentativas de solução, até se obterem valores satisfatórios dos quantitativos dos agregados que enquadrassem na faixa de projeto (25% de pó-de-pedra, 31% de brita 0 e 44% de brita 1), como é mostrado pelos valores contidos no Quadro 4.2 e ilustrado na Figura 4.2.

**Quadro 4.2: Projeto da mistura dos agregados para atender à faixa de projeto.**

Peneiras		faixa de projeto		mistura dos agregados	
ASTM	(mm)	LI	LS	% passante	% retida
1"	25,4	100	100	100,00	0,00
3/4"	19,1	95	100	93,40	6,60
3/8"	9,5	45	70	57,40	36,00
#4	4,8	28	40	33,81	23,59
#10	2,0	20	25	21,18	12,63
#40	0,42	10	20	14,37	6,81
#80	0,18	8	15	9,31	5,06
#200	0,075	3	8	4,75	4,56
Material de fundo		-	-	-	4,75
<b>Soma</b>				<b>100,00</b>	



**Figura 4.2: Limites inferior e superior da faixa de projeto e a curva de trabalho da mistura dos agregados.**

Cabe aqui ressaltar que somente para a fração de  $\frac{3}{4}$ " (19,1 mm) houve problema de atendimento da faixa especificada. Para as demais situações, a **curva de trabalho** enquadrou-se praticamente numa posição intermediária à faixa de projeto.

#### **4.2 – Escolha do teor de projeto de ligante pelo método Marshall**

##### **a) – Emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta (RL – 1C)**

Para este tipo de ligante, foram empregadas duas etapas de ensaios. A primeira com três corpos-de-prova por traço, com os seguintes teores de CAP presentes nas misturas: 4,2%; 5,0%; 5,8% e 6,6%; a segunda com um corpo-de-prova por traço, com os seguintes teores de CAP presentes nas misturas: 4,0%; 4,7%; 5,4% e 6,1%, totalizando 16 corpos-de-prova. Essa segunda etapa foi realizada para atender à padronização dos teores de CAP apresentados na fase 2 do tópico 3, página 49.

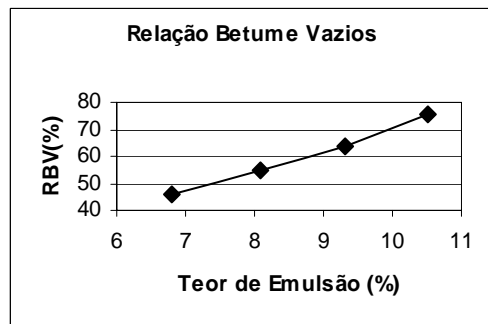
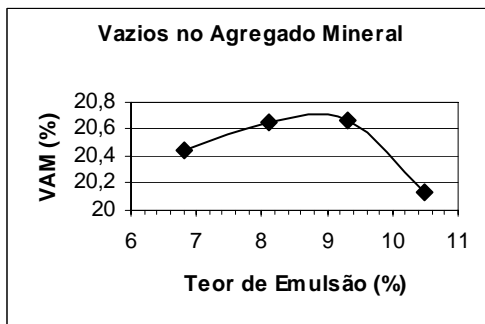
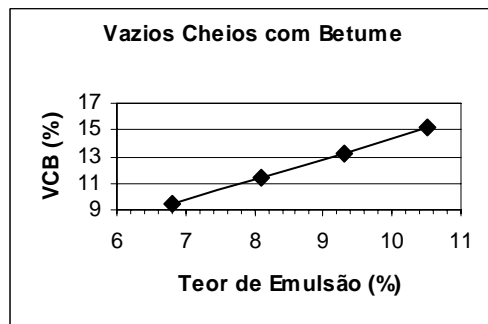
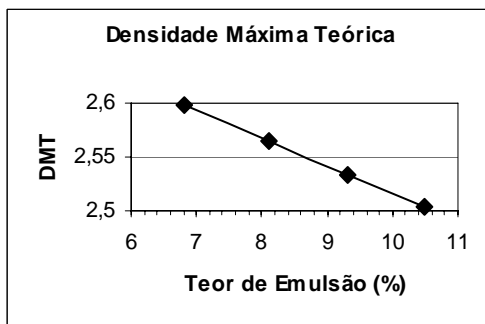
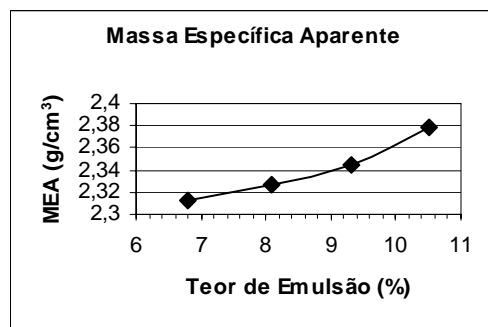
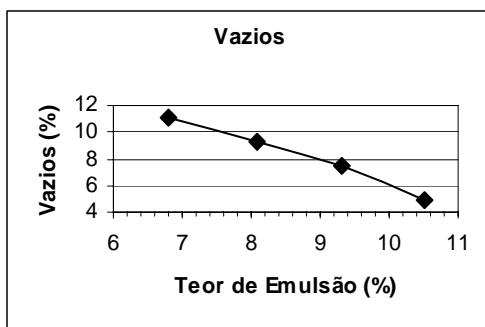
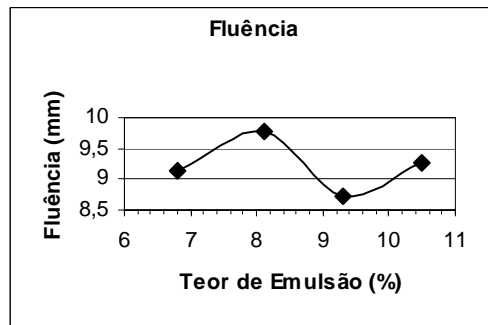
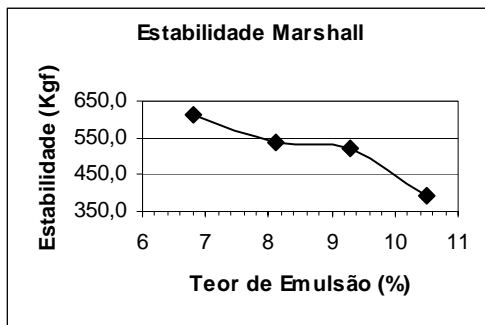
O Quadro 4.3 contém a média dos resultados dos parâmetros de dosagem Marshall de misturas asfálticas, para os agregados atendendo à faixa de projeto com emulsão asfáltica do tipo RL – 1C.

**Quadro 4.3: Parâmetros de dosagem Marshall de misturas asfálticas com emulsão asfáltica do tipo RL – 1C.**

% CAP	% emulsão	MEA (g/cm <sup>3</sup> )	DMT (d)	% vazios	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)	E (kgf)	F (mm)
<b>Primeira etapa</b>									
4,2	6,8	2,312	2,598	11,02	9,41	20,44	46,09	613	9,13
5,0	8,1	2,326	2,564	9,31	11,34	20,65	55,00	539	9,79
5,8	9,3	2,344	2,534	7,48	13,19	20,67	63,83	522	8,73
6,6	10,5	2,379	2,503	4,95	15,19	20,14	75,48	395	9,26
<b>Segunda etapa</b>									
4,0	6,5	2,334	2,606	10,45	9,07	19,52	46,48	455	9,53
4,7	7,6	2,366	2,577	8,19	10,80	19,00	56,87	404	9,53
5,4	8,7	2,350	2,549	7,79	12,34	20,13	61,32	284	8,73
6,1	9,8	2,354	2,521	6,61	13,99	20,60	67,91	208	7,94

**Observação:** MEA: massa específica aparente; DMT: densidade máxima teórica; VCB: vazios cheios com betume; VAM: vazios do agregado mineral; RBV: relação betume-vazios; E: estabilidade Marshall; F: fluência.

As Figuras 4.3a e 4.3b ilustram as variações dos parâmetros de dosagem, Marshall das misturas apresentadas no Quadro 4.3, em função do teor de emulsão, para a primeira e segunda etapas utilizadas na composição dessas misturas.



**Figura 4.3a: Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas em função do teor de emulsão RL-1C (primeira etapa).**

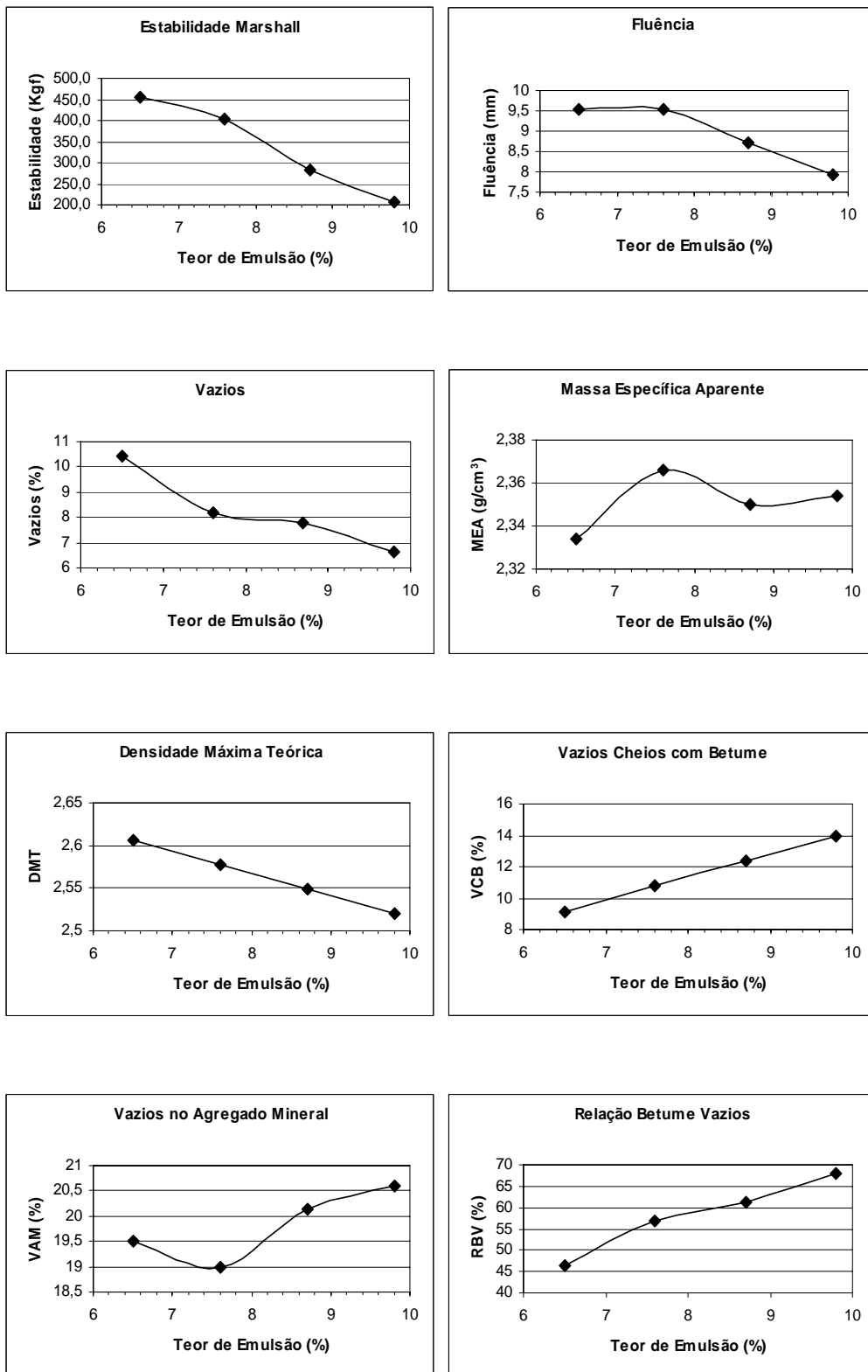


Figura 4.3b: Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas em função do teor de emulsão RL-1C (segunda etapa).

## b) – Emulsão asfáltica catiônica de ruptura média (RM – 1C)

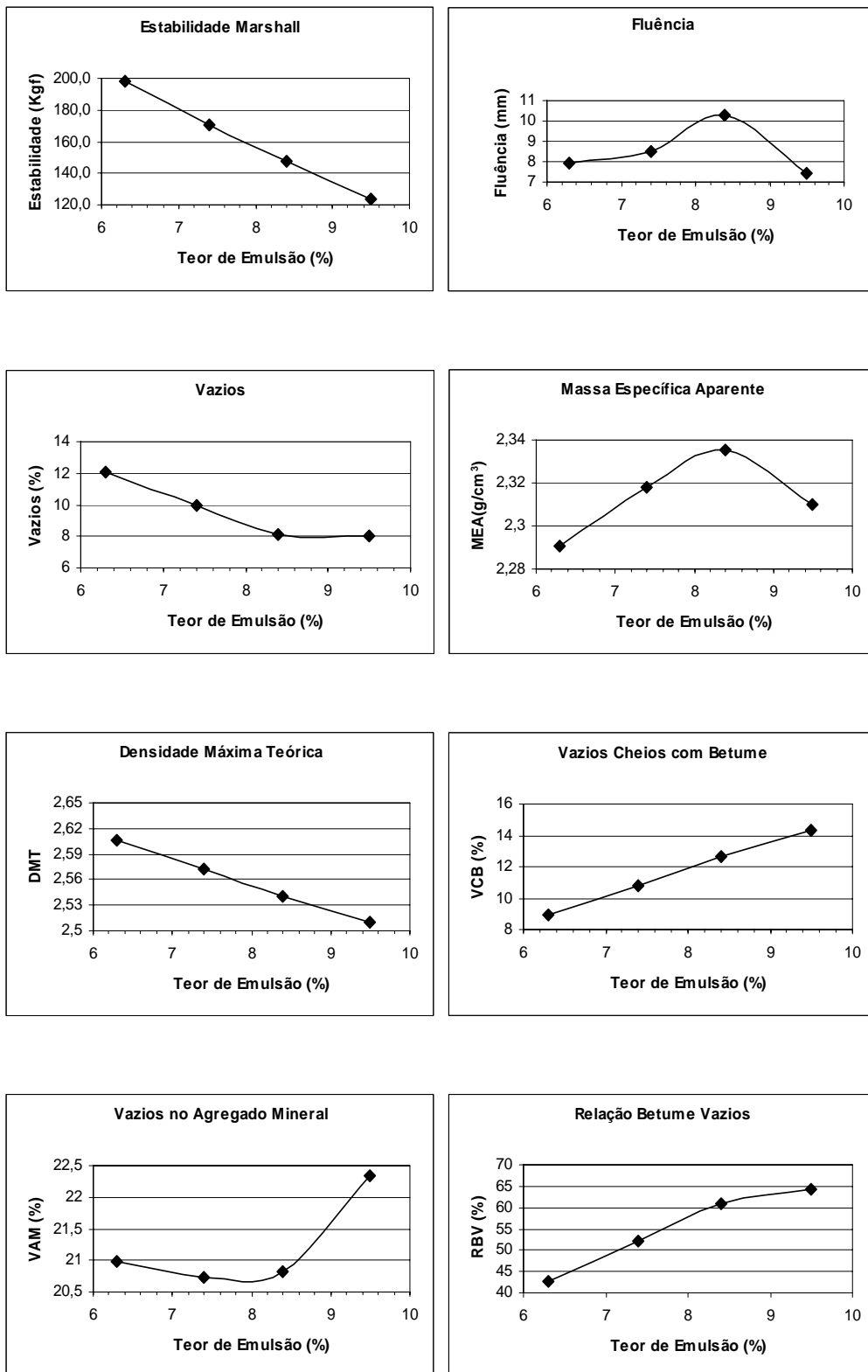
O Quadro 4.4 contém a média dos resultados dos parâmetros de dosagem de misturas asfálticas, para os agregados atendendo à faixa de projeto com emulsão asfáltica do tipo RM – 1C.

**Quadro 4.4: Parâmetros de dosagem Marshall de misturas asfálticas com emulsão asfáltica do tipo RM – 1C.**

<b>% CAP</b>	<b>% emulsão</b>	<b>MEA g/cm<sup>3</sup></b>	<b>DMT (d)</b>	<b>% Vazios</b>	<b>VCB (%)</b>	<b>VAM (%)</b>	<b>RBV (%)</b>	<b>E (kgf)</b>	<b>F (mm)</b>
4,0	6,3	2,291	2,606	12,08	8,90	20,98	42,68	198	7,94
4,7	7,4	2,318	2,573	9,94	10,80	20,74	52,22	171	8,47
5,4	8,4	2,335	2,541	8,13	12,69	20,82	60,96	148	10,32
6,1	9,5	2,310	2,510	7,99	14,35	22,34	64,23	123	7,41

A Figura 4.4 ilustra as variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas apresentadas no Quadro 4.4, em função do teor de emulsão.





**Figura 4.4: Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas em função do teor de emulsão RM-1C.**

**c) – Cimento asfáltico de petróleo (CAP 50-70)**

O Quadro 4.5 contém a média dos resultados dos parâmetros de dosagem Marshall de misturas asfálticas, para os agregados atendendo à faixa de projeto com CAP 50-70.

**Quadro 4.5: Parâmetros de dosagem Marshall de misturas asfálticas com CAP 50-70.**

<b>% CAP</b>	<b>MEA (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>DMT (d)</b>	<b>% Vazios</b>	<b>VCB (%)</b>	<b>VAM (%)</b>	<b>RBV (%)</b>	<b>E (kgf)</b>	<b>F (mm)</b>
4,0	2,498	2,606	4,14	9,70	13,84	70,28	514	6,35
4,7	2,516	2,577	2,37	11,48	13,85	83,11	460	5,82
5,4	2,503	2,549	1,83	13,12	14,95	87,80	568	6,09
6,1	2,515	2,522	0,27	14,89	15,17	98,23	514	6,88

A Figura 4.5 ilustra as variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas apresentadas no Quadro 4.5, em função do teor de CAP.

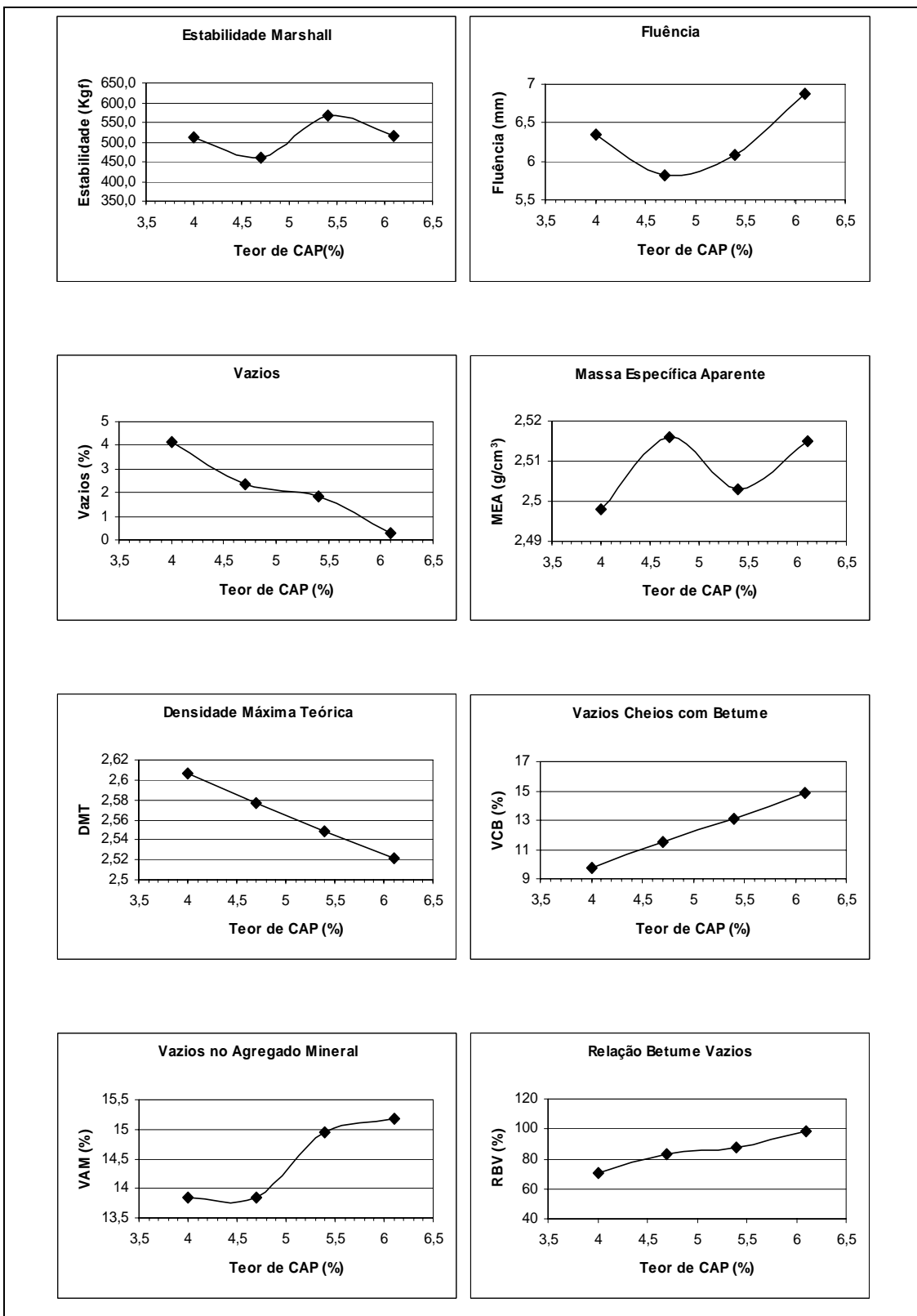


Figura 4.5: Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas em função do teor de CAP 50-70.

#### d) – Teores de projeto de ligantes para as misturas

O método utilizado para a escolha do teor de projeto neste trabalho baseou-se nas relações encontradas entre os parâmetros de dosagem Marshall e que se encontram apresentadas nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5. Tomando-se como base os valores contidos nas especificações de serviço DNER-ES 317/97 para pré-misturado a frio e DNIT 031/2004 para concreto asfáltico, o teor que melhor se enquadrou nos intervalos recomendados por essas especificações, foi considerado o teor de projeto.

Para as misturas a frio considerou-se a estabilidade máxima, a fluência mínima e a % de vazios referente a 10,0%. O valor de 10,0% corresponde à média do intervalo citado pelo Manual Básico de Emulsões Asfálticas da ABEDA (2001) para pré-misturado a frio denso.

Os Quadros 4.6 e 4.7 apresentam os valores de teores de projeto encontrados para os ligantes empregados nesta pesquisa.

**Quadro 4.6: Teores de projeto para as misturas com emulsões dos tipos RL – 1C e RM – 1C**

Indicadores de desempenho	Teores de Ligantes		
	RL – 1C		RM – 1C
	1ª fase	2ª fase	
Marshall			
Máxima	6,80	6,50	6,30
Estabilidade			
Fluência Mínima	9,30	9,80	9,50
Vazios = 10,0%	7,60	6,70	7,30
<b>Teor de projeto de emulsão</b>	<b>7,90</b>	<b>7,70</b>	<b>7,70</b>
	<b>Valor médio: 7,80</b>		
<b>Teor projeto de CAP correspondente</b>	<b>4,80</b>		<b>4,90</b>

**Quadro 4.7: Teor de projeto para mistura com CAP 50-70**

Indicadores de desempenho Marshall	Teor de Ligante
	CAP 50-70
Máxima Estabilidade	5,40
Máxima Massa Espec. Aparente	4,70
Vazios = 4,0%	4,00
RBV = 80%	4,50
<b>Teor de projeto de CAP</b>	<b>4,70</b>

### 4.3 – Método Marshall

A seguir, são apresentados os resultados obtidos pelo método Marshall para os teores de projeto e suas proximidades, ou seja, teor de projeto  $\pm 0,5\%$  de CAP.

#### a) – Emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta (RL – 1C)

O Quadro 4.8 contém a média dos resultados dos parâmetros de dosagem Marshall de misturas com emulsão asfáltica do tipo RL-1C, empregando-se 50 golpes em cada face do corpo-de-prova.

**Quadro 4.8: Parâmetros de dosagem Marshall das misturas no teor de projeto e proximidades com emulsão RL-1C, empregando-se 50 golpes.**

% CAP	% emulsão	MEA (g/cm <sup>3</sup> )	DMT (d)	% vazios	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)	E (kgf)	F (mm)
4,3	7,0	2,368	2,593	8,68	9,93	18,61	53,39	594	7,14
4,8	7,8	2,368	2,572	7,92	11,11	19,03	58,38	652	7,14
5,3	8,5	2,363	2,554	7,47	12,11	19,58	61,87	521	7,41

A Figura 4.6 ilustra as variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas apresentadas no Quadro 4.8, em função do teor de emulsão.

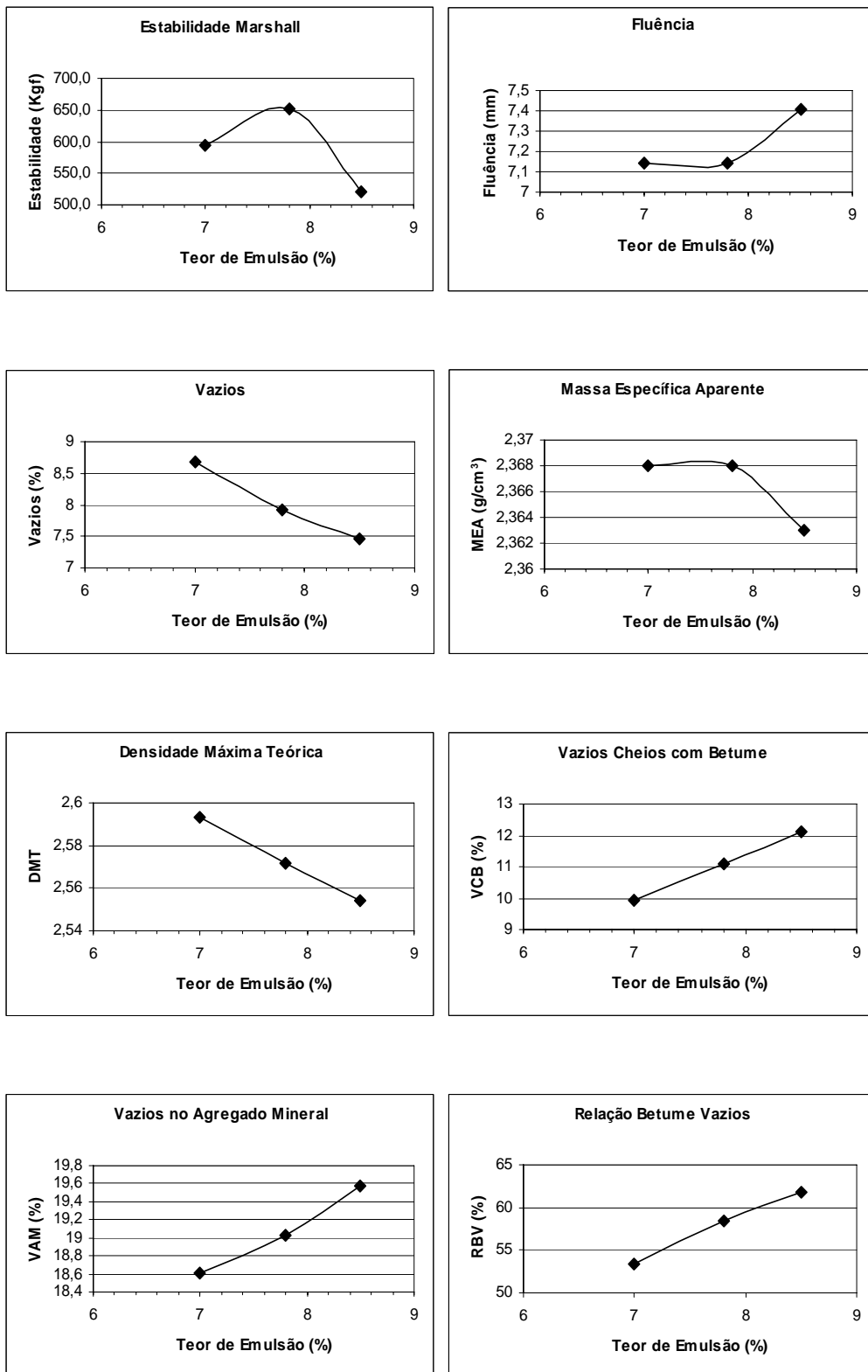


Figura 4.6: Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas em função do teor de emulsão RL-1C para 50 golpes.

Analisando o Quadro 4.8 e a Figura 4.6 verifica-se que os valores de estabilidade Marshall e porcentagem de vazios encontrados atenderam à especificação DNER – ES 317/97 – Pavimentação – Pré-misturado a frio; já os valores de fluência encontrados excederam ao limite superior de 4,5 mm recomendado pela mesma especificação.

Observa-se ainda que, os melhores resultados para estabilidade Marshall e fluência corresponderam ao teor de projeto determinado na dosagem da mistura.

O Quadro 4.9 contém a média dos resultados dos vários parâmetros de dosagem Marshall de misturas com emulsão asfáltica do tipo RL-1C, empregando-se 75 golpes em cada face do corpo-de-prova.

**Quadro 4.9: Parâmetros de dosagem Marshall das misturas no teor de projeto e proximidades com emulsão RL-1C empregando 75 golpes.**

<b>% CAP</b>	<b>% emulsão</b>	<b>MEA (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>DMT (d)</b>	<b>% vazios</b>	<b>VCB (%)</b>	<b>VAM (%)</b>	<b>RBV (%)</b>	<b>E (kgf)</b>	<b>F (mm)</b>
4,3	7,0	2,383	2,593	8,10	10,00	18,09	55,26	668	6,35
4,8	7,8	2,414	2,572	6,14	11,32	17,47	64,84	567	6,88
5,3	8,5	2,379	2,554	6,84	12,20	19,03	64,10	454	7,67

A Figura 4.7 ilustra as variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas apresentadas no Quadro 4.9, em função do teor de emulsão.

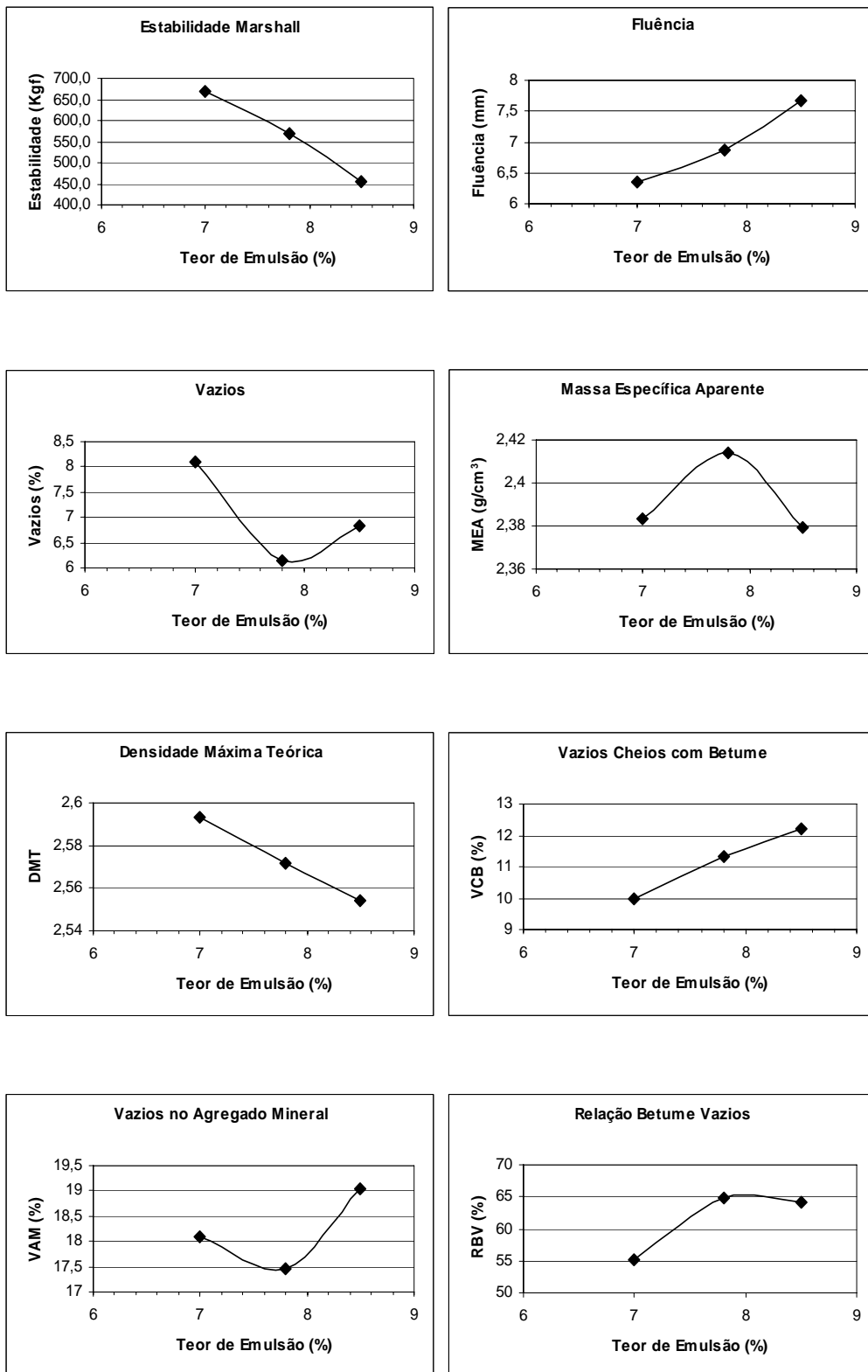


Figura 4.7: Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas em função do teor de emulsão RL-1C para 75 golpes.



Analisando o Quadro 4.9 e a Figura 4.7 verifica-se que os valores de estabilidade Marshall e porcentagem de vazios encontrados atenderam a especificação DNER – ES 317/97 – Pavimentação – Pré-misturado a frio; já os valores de fluência encontrados excederam ao limite superior de 4,5 mm recomendado pela mesma especificação.

Observa-se ainda que, os melhores resultados para estabilidade Marshall e fluência não corresponderam ao teor de projeto determinado na dosagem da mistura. Os melhores resultados encontrados para estes parâmetros corresponderam ao teor de - 0,5% de CAP em relação ao teor de projeto.

Com relação à energia de compactação observou-se o seguinte: para 50 golpes, os melhores resultados encontrados corresponderam ao teor de projeto, especificamente para estabilidade e fluência; para 75 golpes, os melhores resultados encontrados corresponderam ao teor de projeto -0,5%, especificamente para estabilidade e fluência. Confrontando-se as duas situações em termos de estabilidade, os valores obtidos foram muito próximos, ou seja, 652 kgf para 50 golpes e 668 kgf para 75 golpes. Outro aspecto importante observado com relação às duas energias de compactação foi a constância dos valores da densidade máxima teórica.

#### **b) – Emulsão asfáltica catiônica de ruptura média (RM – 1C)**

O Quadro 4.10 contém a média dos resultados dos vários parâmetros de dosagem Marshall de misturas com emulsão asfáltica do tipo RM-1C, empregando-se 50 golpes em cada face do corpo-de-prova.

**Quadro 4.10: Parâmetros de dosagem Marshall das misturas no teor de projeto e proximidades com emulsão RM-1C empregando 50 golpes.**

<b>% CAP</b>	<b>% emulsão</b>	<b>MEA (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>DMT (d)</b>	<b>% Vazios</b>	<b>VCB (%)</b>	<b>VAM (%)</b>	<b>RBV (%)</b>	<b>E (kgf)</b>	<b>F (mm)</b>
4,4	6,9	2,299	2,585	11,03	10,10	21,13	47,93	210	7,94
4,9	7,7	2,281	2,563	11,01	11,18	22,19	50,42	205	10,32
5,4	8,4	2,299	2,542	9,57	12,45	22,02	56,59	182	9,26

A Figura 4.8 ilustra os parâmetros de dosagem Marshall das misturas apresentadas no Quadro 4.10, em função do teor de emulsão.

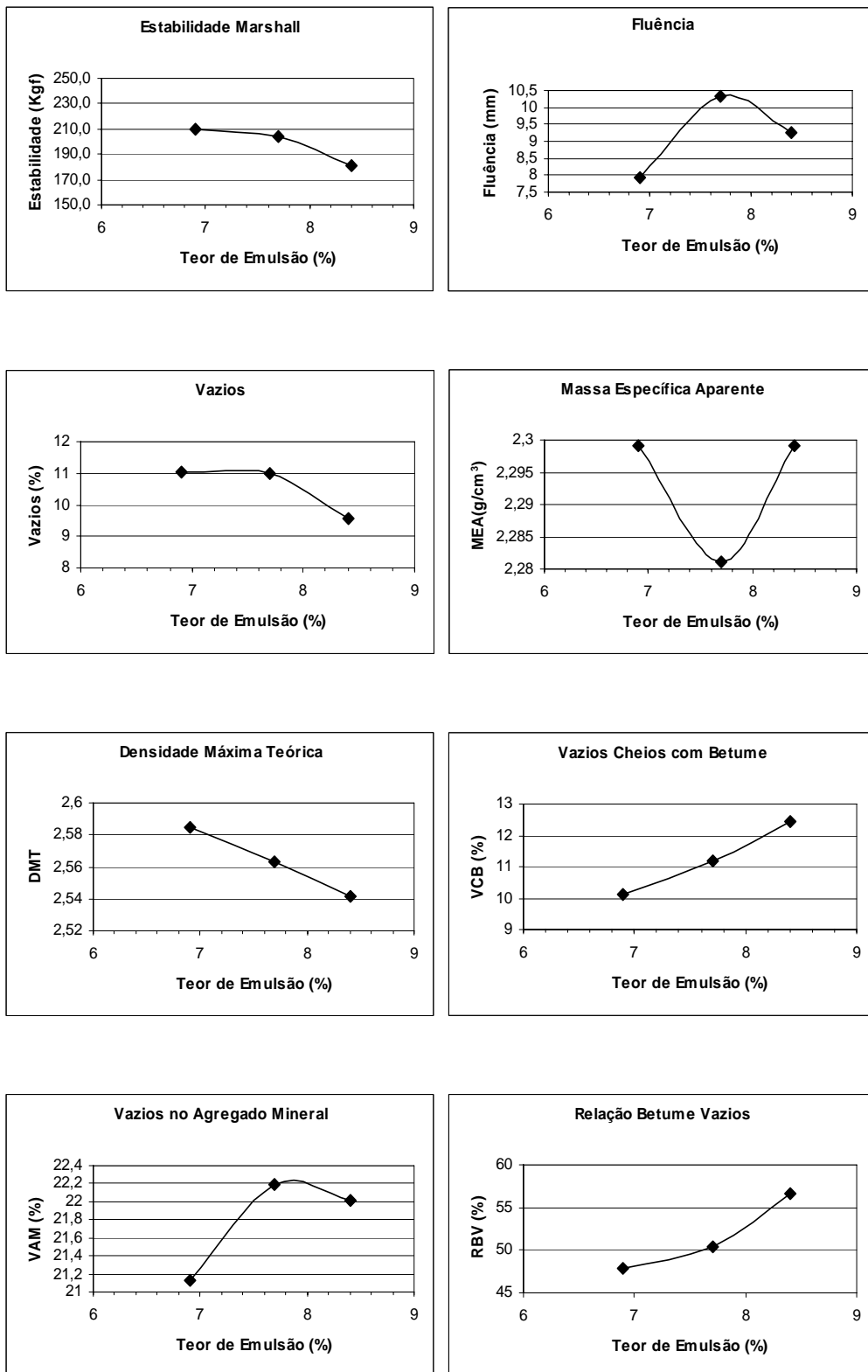


Figura 4.8: Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas em função do teor de emulsão RM-1C para 50 golpes.

Analisando o Quadro 4.10 e a Figura 4.8 verifica-se que os valores de estabilidade Marshall e porcentagem de vazios encontrados atenderam a especificação DNER – ES 317/97 – Pavimentação – Pré-misturado a frio; já os valores de fluência encontrados excederam ao limite superior de 4,5 mm recomendado pela mesma especificação.

Observou-se ainda que, os melhores resultados para estabilidade Marshall e fluência não corresponderam ao teor de projeto determinado na dosagem da mistura, os melhores resultados para estes parâmetros relacionaram-se ao teor de – 0,5% de CAP em relação ao teor de projeto.

O Quadro 4.11 contém a média dos resultados dos vários parâmetros de dosagem de misturas com emulsão asfáltica do tipo RM-1C, empregando-se 75 golpes em cada face do corpo-de-prova.

**Quadro 4.11: Parâmetros de dosagem Marshall das misturas no teor de projeto e proximidades com emulsão RM-1C empregando 75 golpes.**

<b>% CAP</b>	<b>% emulsão</b>	<b>MEA (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>DMT (d)</b>	<b>% vazios</b>	<b>VCB (%)</b>	<b>VAM (%)</b>	<b>RBV (%)</b>	<b>E (kgf)</b>	<b>F (mm)</b>
4,4	6,9	2,294	2,585	11,25	10,08	21,32	47,26	243	7,14
4,9	7,7	2,326	2,563	9,25	11,40	20,65	55,25	213	7,41
5,4	8,4	2,327	2,542	8,48	12,60	21,08	59,89	161	7,67

A Figura 4.9 ilustra as variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas apresentadas no Quadro 4.11, em função do teor de emulsão.

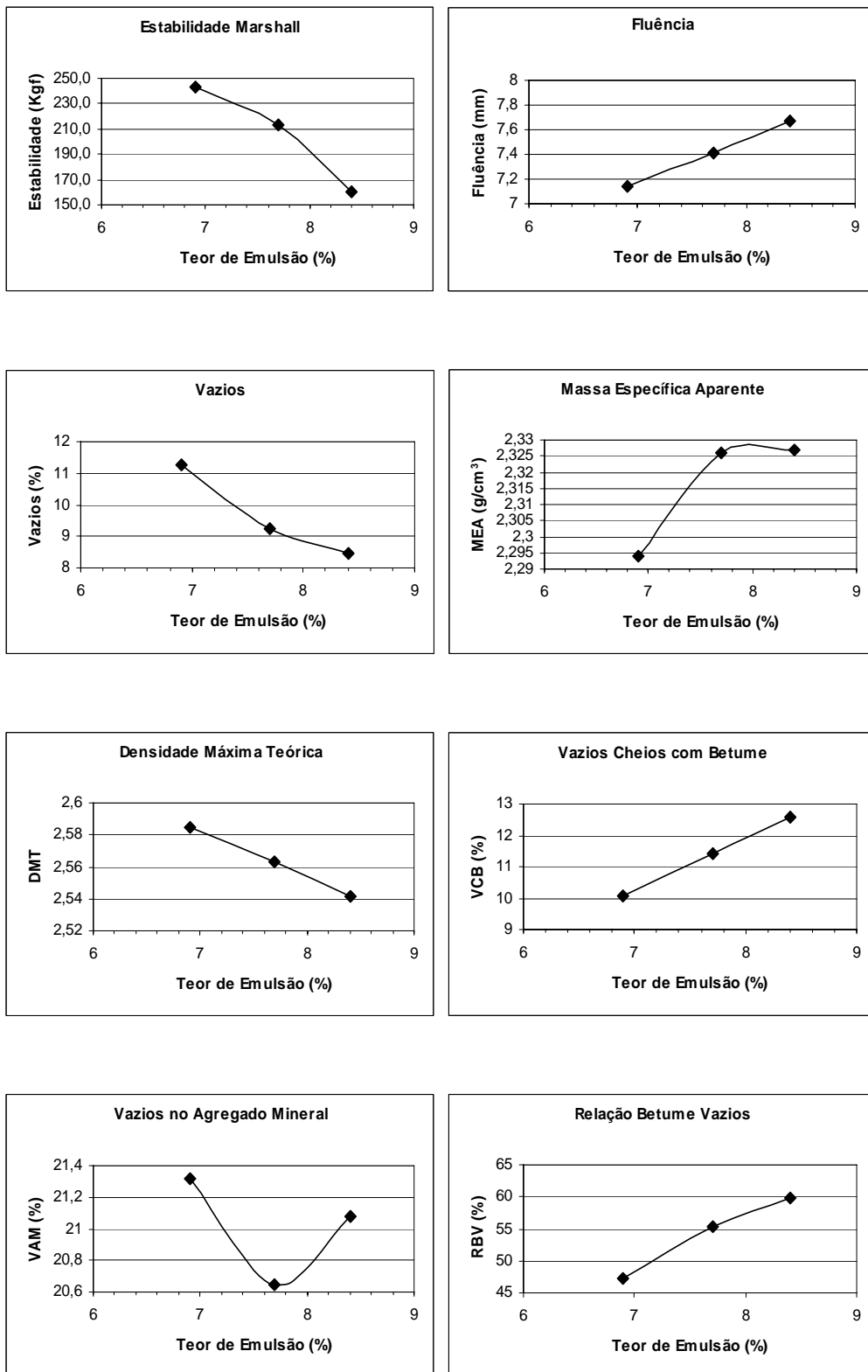


Figura 4.9: Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas em função do teor de emulsão RM-1C para 75 golpes.

Analisando o Quadro 4.11 e a Figura 4.9 verifica-se que os valores de estabilidade Marshall e porcentagem de vazios encontrados atenderam a especificação DNER – ES 317/97 – Pavimentação – Pré-misturado a frio; já os valores de fluência encontrados excederam ao limite superior de 4,5 mm recomendado pela mesma especificação.

Observou-se ainda que, os melhores resultados para estabilidade Marshall e fluência não corresponderam ao teor de projeto determinado na dosagem da mistura. Os melhores resultados encontrados para estes parâmetros corresponderam ao teor de - 0,5% de CAP em relação ao teor de projeto.

Com relação à energia de compactação, os valores de estabilidade Marshall e fluência empregando-se 75 golpes foram ligeiramente melhores, ou seja, aumento na estabilidade de aproximadamente 16% e redução na fluência em torno de 10%.

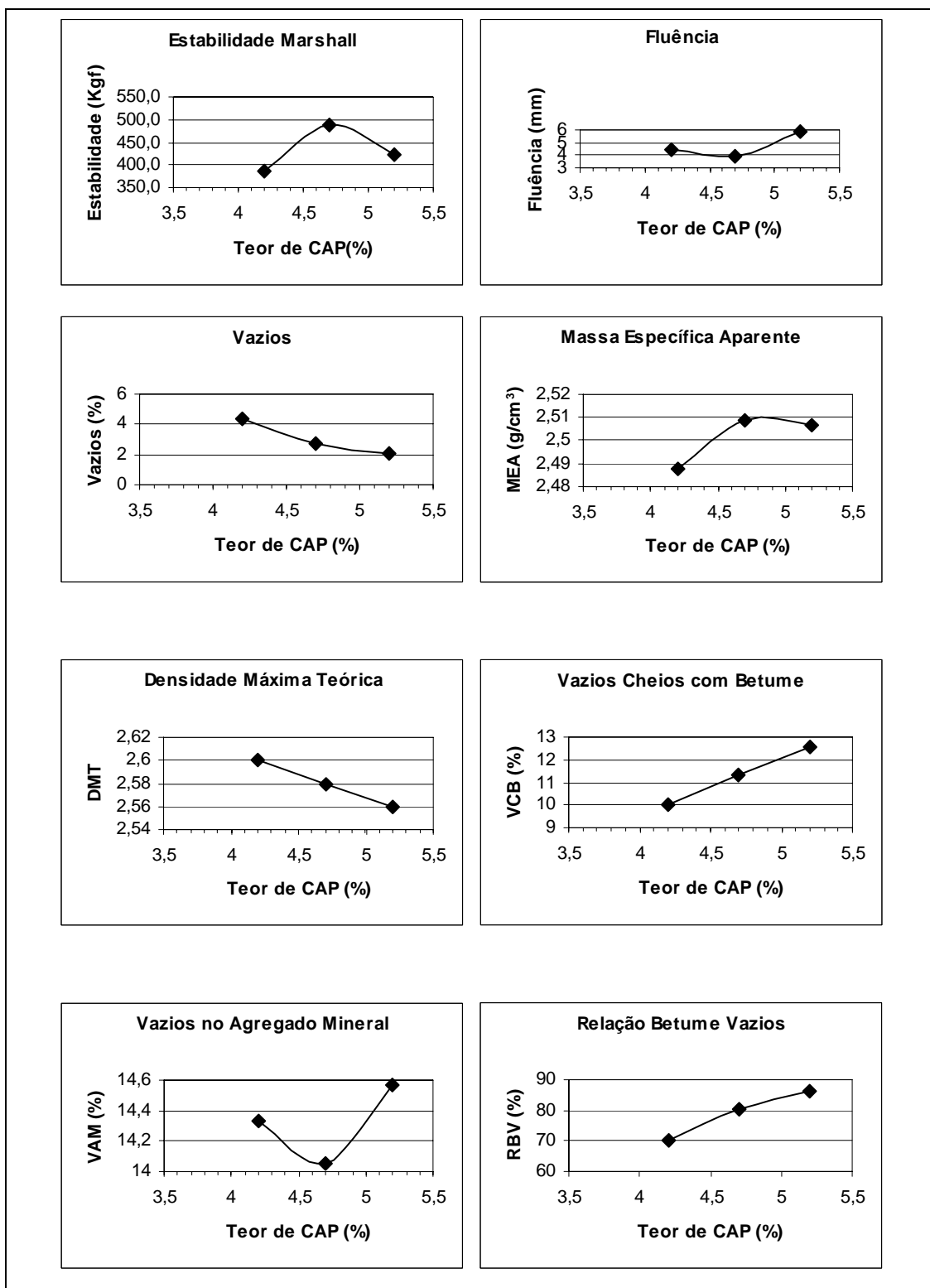
### c) – Cimento asfáltico de petróleo (CAP 50-70)

O Quadro 4.12 contém a média dos resultados dos vários parâmetros de dosagem Marshall de misturas com CAP 50-70, empregando-se 75 golpes em cada face do corpo-de-prova.

**Quadro 4.12: Parâmetros de dosagem Marshall das misturas no teor de projeto e proximidades com CAP 50-70 empregando 75 golpes.**

% CAP	MEA (g/cm <sup>3</sup> )	DMT (d)	% vazios	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)	E (kgf)	F (mm)
4,2	2,488	2,600	4,31	10,02	14,33	69,96	388	4,50
4,7	2,509	2,579	2,72	11,33	14,05	80,62	487	3,97
5,2	2,507	2,559	2,03	12,54	14,57	86,15	423	5,82

A Figura 4.10 ilustra as variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas apresentadas no Quadro 4.12, em função do teor de CAP.



**Figura 4.10: Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas em função do teor de CAP para 75 golpes.**

Analisando o Quadro 4.12, Figura 4.10 e a especificação DNIT 031/2004 – ES – Pavimentos flexíveis – Concreto Asfáltico, verificou-se que os valores de estabilidade Marshall foram inferiores ao valor mínimo de 500

kgf especificado, a porcentagem de vazios só atendeu ao intervalo de 3% a 5% para o teor - 0,5% em relação ao teor de projeto e a relação betume-vazios enquadrou-se no intervalo de 75% a 82% para o teor de projeto.

Observou-se ainda que, os resultados para estabilidade Marshall e porcentagem de vazios correspondentes ao teor de projeto determinado na dosagem da mistura aproximaram-se dos limites mínimos apresentados na especificação DNIT 031/2004 – ES – Pavimentos flexíveis – Concreto Asfáltico, mas foram inferiores.

Observação: com relação ao indicador vazios no agregado mineral (VAM), para os três tipos de ligantes e correspondentes misturas, os valores encontrados sofreram, em média, uma variação de 1% para todos os traços efetuados nesta pesquisa.

#### **4.4 – Resistência à tração por compressão diametral**

A seguir são apresentados os resultados obtidos através da utilização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral compactados segundo o método de ensaio Marshall e ensaiados à temperatura de 30°C.

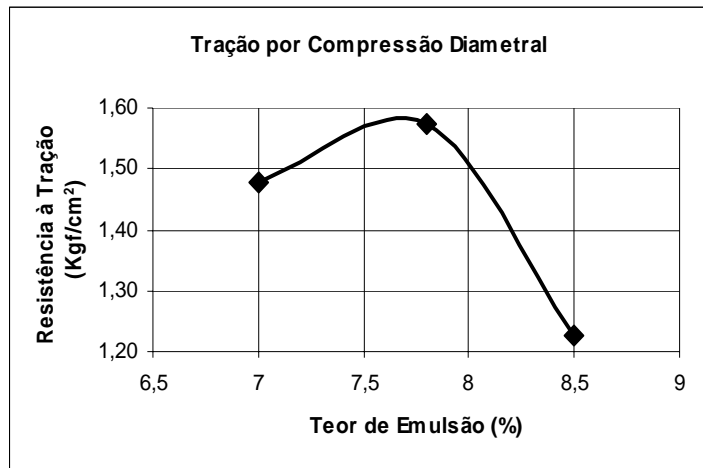
##### **a) – Emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta (RL – 1C)**

O Quadro 4.13 contém a média dos resultados dos ensaios de tração por compressão diametral para misturas com emulsão asfáltica do tipo RL-1C, empregando-se 50 golpes em cada face do corpo-de-prova.

**Quadro 4.13: Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral, à temperatura de 30°C, em misturas com RL – 1C, empregando 50 golpes.**

<b>% CAP</b>	<b>% emulsão</b>	<b>Tração por compressão diametral (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>
4,3	7,0	1,48
4,8	7,8	1,57
5,3	8,5	1,23

A Figura 4.11 ilustra a variação da resistência à tração em função do teor de emulsão mostrado no Quadro 4.13.



**Figura 4.11: Variação da resistência à tração, à temperatura de 30°C, em função do teor de emulsão RL – 1C, empregando 50 golpes.**

Analisando-se o Quadro 4.13 e figura 4.11, verifica-se que o maior valor encontrado para a resistência à tração correspondeu ao teor de projeto determinado na dosagem Marshall, ou seja, 1,57 kgf/cm<sup>2</sup>.

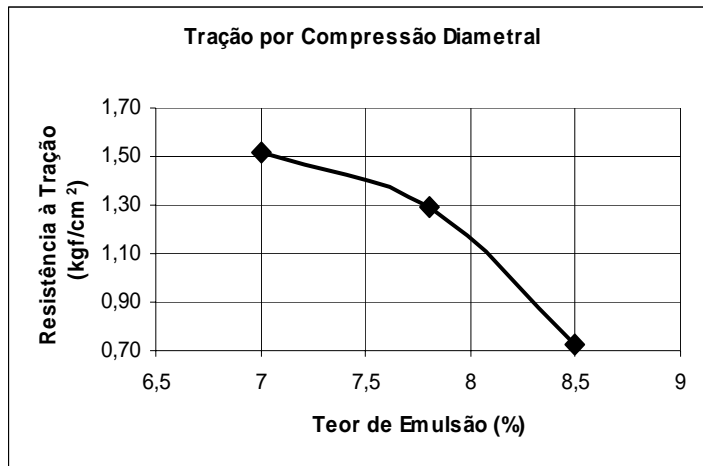
O Quadro 4.14 contém a média dos resultados dos ensaios de tração por compressão diametral, à temperatura de 30°C, para misturas com emulsão asfáltica do tipo RL-1C, empregando-se 75 golpes em cada face do corpo-de-prova.

**Quadro 4.14: Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral, à temperatura de 30°C, em misturas com RL – 1C, empregando 75 golpes.**

% CAP	% emulsão	Tração por compressão diametral (kgf/cm <sup>2</sup> )
4,3	7,0	1,51
4,8	7,8	1,29
5,3	8,5	0,72

A Figura 4.12 ilustra a variação da resistência à tração em função dos teores de emulsão contidos no Quadro 4.14.





**Figura 4.12: Variação da resistência à tração, à temperatura de 30°C, em função do teor de emulsão RL – 1C, empregando 75 golpes.**

Analisando-se o Quadro 4.14 e figura 4.12, verifica-se que o maior valor encontrado para a resistência à tração para misturas utilizando emulsão asfáltica do tipo RL – 1C empregando-se 75 golpes correspondeu ao teor de projeto – 0,5%, determinado na dosagem Marshall, valor este de 1,51 kgf/cm<sup>2</sup>.

Com relação à energia de compactação, os valores de resistência à tração para 75 golpes foram ligeiramente inferiores aos valores encontrados, empregando-se 50 golpes, isto para dois dos três teores de emulsão empregados. Para o teor de projeto + 0,5 de CAP, esta inferioridade foi mais ainda evidenciada.

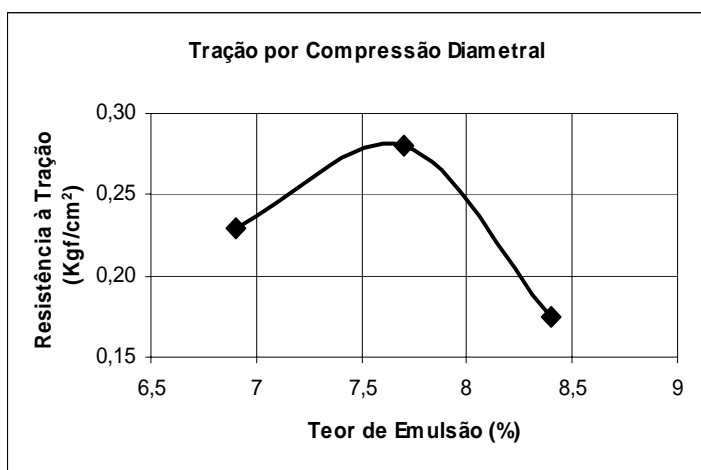
#### **b) – Emulsão asfáltica catiônica de ruptura média (RM – 1C)**

O Quadro 4.15 contém a média dos resultados dos ensaios de tração por compressão diametral para misturas com emulsão asfáltica do tipo RM-1C, empregando-se 50 golpes em cada face do corpo-de-prova.

**Quadro 4.15: Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral, à temperatura de 30°C, em misturas com RM – 1C, empregando 50 golpes.**

% CAP	% emulsão	Tração por compressão diametral (kgf/cm <sup>2</sup> )
4,4	6,9	0,23
4,9	7,7	0,28
5,4	8,4	0,18

A Figura 4.13 ilustra a variação da resistência à tração em função do teor de emulsão mostrado no Quadro 4.15.



**Figura 4.13: Variação da resistência à tração, à temperatura de 30°C, em função do teor de emulsão RM – 1C, empregando 50 golpes.**

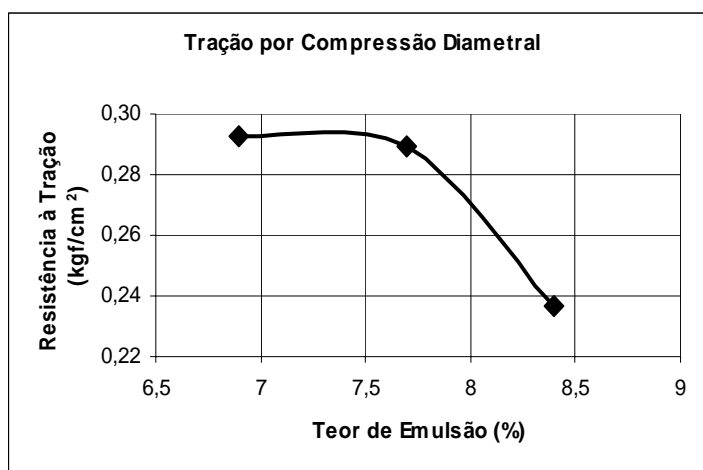
Analisando-se o Quadro 4.15 e figura 4.13, verifica-se que o maior valor encontrado para a resistência à tração correspondeu ao teor de projeto determinado na dosagem Marshall, ou seja, 0,28 kgf/cm<sup>2</sup>.

O Quadro 4.16 contém a média dos resultados dos ensaios de tração por compressão diametral para misturas com emulsão asfáltica do tipo RM-1C, empregando-se 75 golpes em cada face do corpo-de-prova.

**Quadro 4.16: Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral, à temperatura de 30°C, em misturas com RM – 1C, empregando 75 golpes.**

% CAP	% emulsão	Tração por compressão diametral (kgf/cm <sup>2</sup> )
4,4	6,9	0,29
4,9	7,7	0,29
5,4	8,4	0,24

A Figura 4.14 ilustra a variação da resistência à tração em função do teor de emulsão mostrado no Quadro 4.16.



**Figura 4.14: Variação da resistência à tração, à temperatura de 30°C, em função do teor de emulsão RM – 1C, empregando 75 golpes.**

Analisando-se o Quadro 4.16 e figura 4.14, verifica-se que o maior valor encontrado para a resistência à tração para misturas utilizando emulsão asfáltica do tipo RM – 1C empregando-se 75 golpes correspondeu aos teores de – 0,5% do teor de projeto e ao teor de projeto determinado na dosagem Marshall, valor este de 0,29 kgf/cm<sup>2</sup>.

Com relação à energia de compactação, os valores de resistência à tração empregando-se 75 golpes foram superiores aos valores encontrados empregando-se 50 golpes.

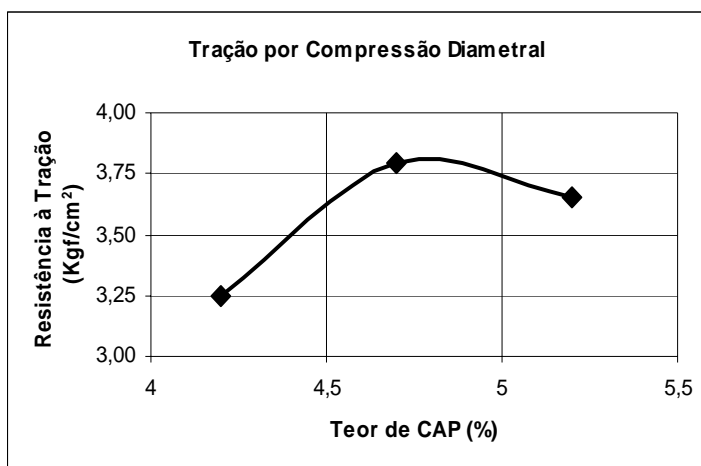
### c) – Cimento asfáltico de petróleo (CAP 50-70)

O Quadro 4.17 contém a média dos resultados dos ensaios de tração por compressão diametral, à temperatura de 30°C, para misturas com CAP 50-70, empregando-se 75 golpes em cada face do corpo-de-prova.

**Quadro 4.17: Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral, à temperatura de 30°C, em misturas com CAP 50-70, empregando 75 golpes.**

% CAP	Tração por compressão diametral (kgf/cm <sup>2</sup> )
4,2	3,24
4,7	3,80
5,2	3,65

A Figura 4.15 ilustra a variação da resistência à tração em função do teor de CAP mostrado no Quadro 4.17.



**Figura 4.15: Variação da resistência à tração, à temperatura de 30°C, em função do teor de CAP, empregando 75 golpes.**

Analisando-se o Quadro 4.17 e figura 4.15, verifica-se que o maior valor encontrado para a resistência à tração para misturas utilizando cimento asfáltico do tipo CAP 50-70 empregando-se 75 golpes correspondeu ao teor de projeto determinado na dosagem Marshall, ou seja, 3,8 kgf/cm<sup>2</sup>.

MEDINA (1997) apresentou valores de resistência à tração para misturas betuminosas destinadas à camadas de rolamento e de ligação, com

cimento asfáltico do tipo CAP 50-60, à temperatura de 25°C, variando entre 7,1 kgf/cm<sup>2</sup> a 9,5 kgf/cm<sup>2</sup>. Observa-se que esses valores são bem superiores aos encontrados neste trabalho. Cabe ressaltar que a temperatura, a granulometria e o tipo de ligante foram diferentes.

#### **4.5 – Deformação permanente**

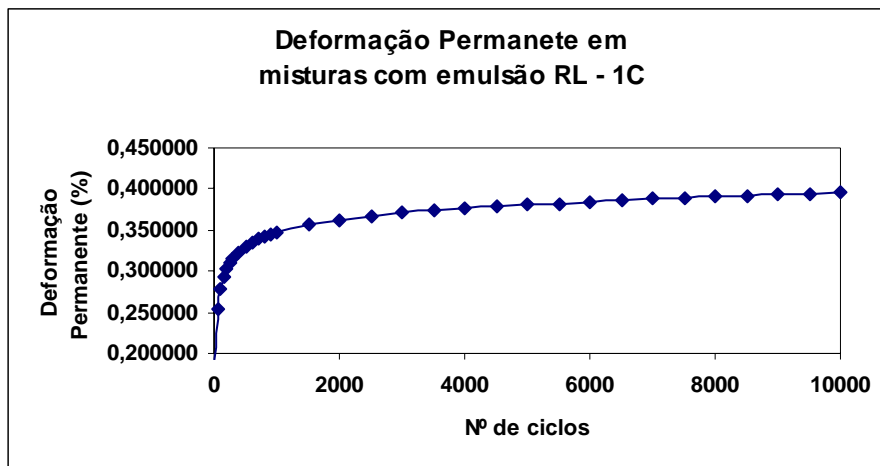
Apresentam-se a seguir, os resultados do ensaio triaxial de cargas repetidas realizados no teor de projeto para cada tipo de ligante empregado nesta pesquisa. Realizou-se o ensaio à temperatura ambiente, ou seja, 27°C. A variação de temperatura no interior da câmara triaxial e exterior a ela foi cerca de 1°C.

O Quadro 4.18 contém a média dos resultados dos ensaios de deformação permanente para misturas com emulsões asfálticas RL-1C e RM-1C e misturas com CAP 50-70.

**Quadro 4.18: Deformação permanente para misturas betuminosas com emulsões asfálticas RL – 1C e RM – 1C e misturas com CAP 50-70, para tensão desviadora de 210 kPa e pressão confinante de 175 kPa. Temperatura média do ensaio em relação à câmara triaxial: externa 27 °C e interna 26 °C.**

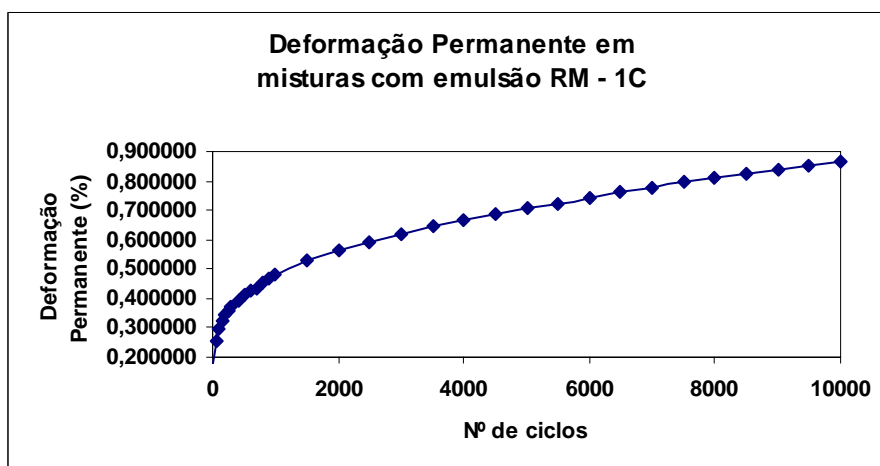
Nº de ciclos	Deformação Permanente (%)		
	RL – 1C	RM - 1C	CAP 50-70
10	0,189883	0,170135	0,145470
50	0,255053	0,252890	0,235270
100	0,278093	0,294440	0,279230
150	0,292450	0,321130	0,306265
200	0,302397	0,341115	0,325820
250	0,309573	0,357225	0,341515
300	0,314777	0,370825	0,354600
400	0,323717	0,393260	0,376610
500	0,329893	0,411065	0,396135
600	0,334900	0,425960	0,399495
700	0,338980	0,436605	0,415905
800	0,342463	0,454285	0,430330
900	0,345240	0,467430	0,443050
1000	0,347890	0,479695	0,453560
1500	0,356477	0,526500	0,493240
2000	0,362220	0,562145	0,521255
2500	0,367190	0,592360	0,544885
3000	0,370903	0,618890	0,562935
3500	0,373830	0,643675	0,581210
4000	0,376553	0,665105	0,597565
4500	0,378407	0,685215	0,615515
5000	0,380503	0,704440	0,630800
5500	0,382287	0,722435	0,641895
6000	0,384440	0,742300	0,656395
6500	0,386257	0,761960	0,670345
7000	0,387653	0,779125	0,683980
7500	0,389640	0,794560	0,696150
8000	0,390210	0,808600	0,707615
8500	0,391400	0,823485	0,718935
9000	0,392633	0,837340	0,731050
9500	0,394400	0,850095	0,742990
10000	0,395117	0,863320	0,754700

A Figura 4.16 ilustra a evolução das deformações permanentes apresentadas no Quadro 4.18 em função do número de aplicações da tensão desviadora axial cíclica para misturas betuminosas com emulsão asfáltica RL – 1C.



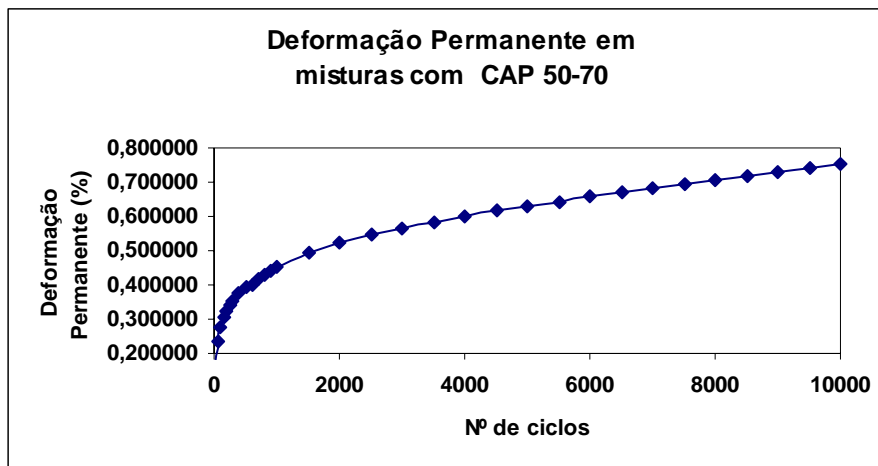
**Figura 4.16: Evolução das deformações permanentes em função do número de aplicações da tensão desviadora axial cíclica para misturas com emulsão do tipo RL – 1C, com Grau de Compactação de 98%, à temperatura de 27°C.**

A Figura 4.17 ilustra a evolução das deformações permanentes apresentadas no Quadro 4.18 em função do número de aplicações da tensão desviadora axial cíclica para misturas com emulsão do tipo RM – 1C.



**Figura 4.17: Evolução das deformações permanentes em função do número de aplicações da tensão desviadora axial cíclica para misturas com emulsão do tipo RM – 1C, com Grau de Compactação de 99%, à temperatura de 27°C.**

A Figura 4.18 ilustra a evolução das deformações permanentes apresentadas no Quadro 4.18 em função do número de aplicações da tensão desviadora axial cíclica para misturas com CAP 50-70.



**Figura 4.18: Evolução das deformações permanentes em função do número de aplicações da tensão desviadora axial cíclica para misturas com CAP 50-70, com Grau de Compactação de 95%, à temperatura de 27°C.**

Pela análise do Quadro 4.18 e figuras 4.16, 4.17 e 4.18, nota-se que as deformações permanentes aumentaram na medida em que o número de repetições de carga aumentou. Para os primeiros ciclos, este aumento foi mais pronunciado.

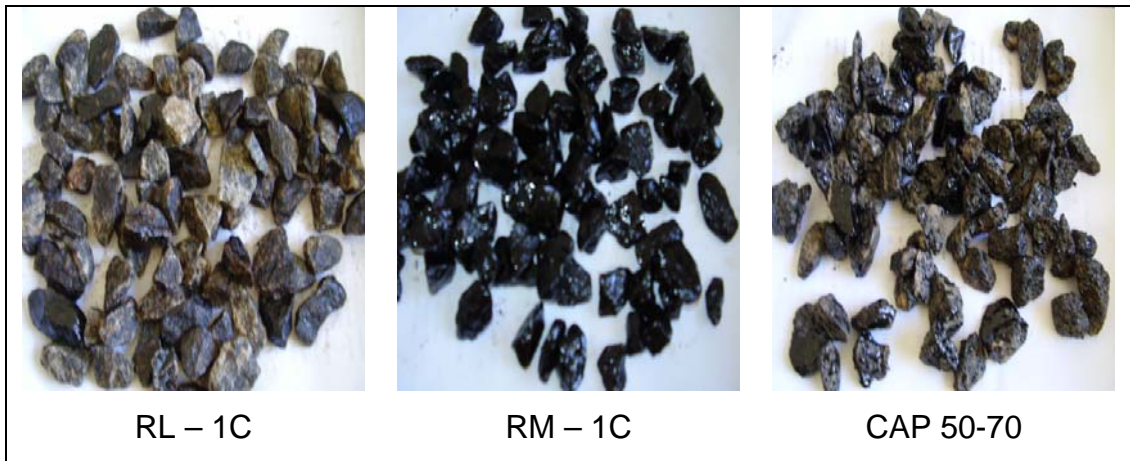
A influência do ligante presente na mistura pode ser visualizada pelos valores encontrados ao final dos 10.000 ciclos, onde se percebem valores bem inferiores para as misturas com emulsão do tipo RL – 1C. Cabe aqui ressaltar, que na moldagem das amostras das misturas a quente não foi possível alcançar o mesmo grau de compactação das misturas a frio, dificultando uma análise comparativa mais acurada quanto ao desempenho das misturas.

#### **4.6 – Resistência à água (adesividade)**

Conforme o método de ensaio DNER 078/94, verificou-se uma condição não satisfatória para as misturas empregando emulsão RL – 1C e CAP 50-70, pois houve um considerável deslocamento da película betuminosa dos agregados misturados com emulsão RL – 1C, após 72 horas recobertos com água destilada em estufa à temperatura de 40°C e um deslocamento parcial da película betuminosa nos agregados envoltos com o CAP 50-70 nas mesmas condições.



Uma condição satisfatória foi observada para a mistura empregando-se emulsão RM – 1C, onde não se verificou qualquer deslocamento da película betuminosa nos agregados. A Figura 4.19, a seguir, evidencia as análises citadas anteriormente.



**Figura 4.19: Envolvimento dos agregados pelos ligantes betuminosos após 72 horas recobertos por água destilada em estufa à 40°C.**

## 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 – Conclusões

Através da análise e interpretação dos resultados apresentados no tópico anterior, as principais conclusões desta pesquisa são as seguintes:

- a) o atendimento da faixa de granulometria para um determinado tipo de mistura betuminosa é um dos requisitos mais importantes para o seu bom desempenho. A faixa granulométrica utilizada neste trabalho atendeu à especificação DNIT 031/2004 do concreto asfáltico, mas não atendeu à especificação DNER 317/97 do pré-misturado a frio para a fração  $\frac{3}{4}$ " (19,1mm). Entretanto, situou-se praticamente numa posição intermediária à faixa de projeto. A tolerância não deve ser aplicada às faixas especificadas para projetos de misturas betuminosas em laboratório, salvo para execução das misturas em usinas;
- b) para todos os traços de misturas betuminosas empregados nesta pesquisa, os valores de fluência ultrapassaram os limites superiores recomendados nas especificações de serviço. Assim, neste trabalho, ficou sinalizada uma necessidade de rever esses

limites. Entretanto, se a prensa não for automatizada, após a percepção da ruptura do corpo-de-prova pelo operador e, em seguida, a sua reação para desligar a máquina, a amostra continua se deformando;

- c) não se observou influência significativa quanto à energia de compactação nos resultados do ensaio Marshall para as misturas betuminosas a frio, já que os valores de estabilidade, porcentagem de vazios e fluência foram próximos para ambas às energias empregadas nos três teores estudados. Assim, o limite do número de golpes para a compactação das amostras é uma questão importante a ser revista;
- d) os maiores valores de estabilidade encontrados para a mistura empregando-se CAP corresponderem ao teor de projeto encontrado na dosagem Marshall. Entretanto, esses valores foram inferiores ao limite mínimo recomendado na especificação de serviço;
- e) com relação ao indicador vazios no agregado mineral (VAM), para os três tipos de ligantes e correspondentes misturas, os valores encontrados variaram aproximadamente de 1% para todos os traços efetuados nesta pesquisa, justificando investigar este indicador como aproximadamente constante para uma determinada granulometria e energia de compactação;
- f) no que diz respeito à resistência à tração por compressão diametral, à temperatura de 30°C, notou-se, em sua maioria, que os melhores valores corresponderam ao teor de projeto encontrado na dosagem Marshall para os três tipos de ligantes. Nas misturas a frio, observou-se uma proximidade dos valores para as duas energias de compactação; os baixos valores

encontrados podem estar relacionados à temperatura e equipamentos empregados no ensaio;

- g) com relação às deformações permanentes, as misturas com emulsão do tipo RL – 1C apresentaram deformações permanentes inferiores às misturas com emulsão do tipo RM – 1C. Este comportamento foi observado ao longo de todos os ciclos do ensaio;
- h) nos estudos de deformação permanente, devido à infra-estrutura de laboratório disponível, não foi possível alcançar para as misturas a quente o mesmo grau de compactação obtido para as misturas a frio, dificultando uma análise comparativa mais acurada quanto ao desempenho das referidas misturas;
- i) quanto ao ensaio de adesividade que se utiliza para analisar o possível deslocamento da película betuminosa pela ação da água, as misturas, empregando-se emulsão asfáltica do tipo RL – 1C e CAP 50-70, apresentaram resultados insatisfatórios. O emprego deste ensaio deve ser realizado no início dos trabalhos, pois permite verificar a necessidade ou não de utilização de melhoradores de adesividade ou troca de materiais.

## **5.2 – Recomendações**

Para futuros trabalhos recomenda-se:

- a) estudar o comportamento mecânico de misturas betuminosas obtendo novas composições granulométricas com agregados de origens diferentes dos empregados nesta pesquisa. Também, utilizar ligantes betuminosos de asfaltos modificados com polímero e asfaltos com adição de teores de borracha moída de pneu;

- b) estudar ainda a influência da variação granulométrica no desempenho das misturas a frio e a quente;
- c) estudar o comportamento quanto a deformação permanente e à fadiga de misturas betuminosas buscando um balanço ideal do teor de betume a ser empregado, pois tem se verificado que aumentando o teor de betume melhora a vida de fadiga; em contrapartida, aumenta a deformação permanente;
- d) estudar a influência do tipo de compactação (por impacto e giratória) nas misturas empregadas nesta pesquisa;
- e) estudar a adição de melhoradores de adesividade para os materiais empregados nesta pesquisa, principalmente para as misturas em que os resultados foram insatisfatórios;
- f) estudar o módulo de resiliência e a deformação permanente de misturas betuminosas para teores de CAP acima e abaixo do ótimo;
- g) estudar as misturas através do ensaio triaxial convencional para obter os parâmetros de resistência ao cisalhamento das misturas;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEDA. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas – Soluções para pavimentar sua cidade**. Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto (ADEBA), Rio de Janeiro-RJ, 2001. 136p.
- AMARAL, S. C. **Estudos de Misturas Asfálticas Densas com Agregados do Estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP 40) e asfalto modificado com polímero SBS (BETUFLEX B 65/60)**. Tese de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2000, 147p.
- ASTM Designation: D 4123 – 82 (Reapproved 1995). **Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures**. American Society for Testing Materials. PA 19428 Reprinted from the annual Book of ASTM Standards. Copyright ASTM.
- BEZERRA NETO, R. S. **Análise Comparativa de Pavimentos Dimensionados através dos Métodos Empírico do DNER e Mecanístico e Proposta de um Catálogo Simplificado de Pavimentos para a região de Campo Grande (MS)**. Tese de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2004, 169p.

CARVALHO, C. A. B. **Estudo da Contribuição das Deformações Permanentes das Camadas de Solo na Formação de Trilhas-de-Roda num Pavimento Flexível. São Carlos-SP. Tese de Doutorado** – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 1997. 290p.

CARVALHO, C. A. B. et al **Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas Betuminosas a Frio envolvendo Agregados localizados nas proximidades de Viçosa para fins de Pavimentação em Obras Rodoviárias.** Relatório Final de Projeto de Pesquisa – Ref. TEC 1215/98 – FAPEMIG, Viçosa-MG, 2002. 110p.

CASTRO, L. N. **Reciclagem à frio “in situ” com Espuma de Asfalto. Tese de Mestrado. Tese de Mestrado** – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro-RJ, 2003. 171p.

CNT, **Pesquisa Rodoviária: Relatório Gerencial.** Confederação Nacional do Transporte. Brasília-DF, 2006. 153p.

COELHO, V. **Considerações sobre o Método Marshall.** In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 26<sup>a</sup>, Aracaju-SE, 1992. p. 233 a 298.

COELHO, V. **Contribuição ao Estudo das Deformações Permanentes, nas Condições do Brasil, em Camadas de Concreto Asfáltico de Pavimentação. Tese de Doutorado** – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 1996. 191p.

DNER. **Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall. MT** – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Norma Rodoviária, ME 043/95, Rio de Janeiro-RJ, 1995. 11p.

DNER. **Misturas Betuminosas a Frio, com Emulsão Asfáltica – Ensaio Marshall. MT** – Departamento de Estradas de Rodagem, Norma Rodoviária, ME 107/94, Rio de Janeiro-RJ, 1994. 09p.

**DNER. Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência. MT** – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Norma Rodoviária, ME 133/94, Rio de Janeiro-RJ, 1994. 05p.

**DNER. Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração. MT** – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Norma Rodoviária, ME 138/94, Rio de Janeiro-RJ, 1994. 04p.

**DNER. Pavimentação – Tratamento superficial simples. MT** – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Especificação de Serviço, ES 308/97, Rio de Janeiro-RJ, 1997. 09p.

**DNER. Pavimentação – Tratamento superficial duplo. MT** – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Especificação de Serviço, ES 309/97, Rio de Janeiro-RJ, 1997.10p.

**DNER. Pavimentação – Tratamento superficial triplo. MT** – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Especificação de Serviço, ES 310/97, Rio de Janeiro-RJ, 1997. 10p.

**DNER. Pavimentação – Macadame betuminoso por penetração. MT** – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Especificação de Serviço, ES 311/97, Rio de Janeiro-RJ, 1997. 12p.

**DNER. Pavimentação – Lama asfáltica. MT** – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Especificação de Serviço, ES 314/97. Rio de Janeiro-RJ, 1997. 09p.

**DNER. Pavimentação – Pré-Misturado a Frio. MT** – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Especificação de Serviço, ES 317/97. Rio de Janeiro-RJ, 1997. 14p.

**DNIT. Manual de Pavimentação. MT** – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, 3ª edição, Rio de Janeiro-RJ, 2006. 274p.



- DNIT. **Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico** – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, Especificação de Serviço, ES 031/2004. Rio de Janeiro-RJ, 2004. 13p.
- DNIT. **Pavimentos Flexíveis – Areia asfalto a quente** – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, Especificação de Serviço, ES 032/2005. Rio de Janeiro-RJ, 2005. 12p.
- GONÇALVES, F. J. P. **O desempenho dos pavimentos flexíveis**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS, 1999. 150p.
- HAAS, R.; HUDSON, W.R. **Pavement management systems**. New York, McGraw-Hill Book Company, 1978. 455 p.
- HAAS, R.; HUDSON, W.R.; ZANIEWSKI, J. **Modern pavement management**. Florida, Krieger Publishing Company Malabar, 1994. 583 p.
- IBP. **Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos**. Instituto Brasileiro de Petróleo, Comissão de Asfalto, 6ª edição, Rio de Janeiro-RJ, 1999, 76p.
- FERNANDES JÚNIOR, A. **Manual de Pavimentação Urbana**. IPT, São Paulo-SP, 1992. 236p.
- JUVÊNCIO, E. L. **Estudo do Efeito da Adição de Polímero no Comportamento Mecânico de Misturas Betuminosas a Frio**. Tese de Mestrado – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2001. 109p.
- LIMA, D. C.; BUENO, B. S. **Pavimentação Betuminosa – Os Materiais Betuminosos**. Imprensa Universitária UFV, Viçosa –MG, 1981. 57p.
- MAMLOUK, M. S.; SAROFIM, R. T. **Modulos of Asphalt Mixtures - an Unresolved Dilemma**. Transportation Research Record, n. 1171, National Research Council, Washington-D.C., 1988. p. 194 a 198.

- MARQUES, G. L. O. **Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica; Efeito da Compactação por Impacto e Giratória. Tese de Doutorado.** – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro-RJ, 2004. 461p.
- MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos.** Editora UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 1997. 380p.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos.** 2ª edição, Editora UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 2005. 574p.
- MORILHA JÚNIOR, A. **Estudo sobre a ação de Modificadores no Envelhecimento dos Ligantes Asfálticos e nas Propriedades Mecânicas e de Fadiga das Misturas Asfálticas. Tese de Mestrado.** – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2004, 165p.
- MOURÃO, F. A. L. **Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Tipo SMA. Tese de Mestrado.** – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro-RJ, 2003. 131p.
- ODA, S. **Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Ligante Asfalto-Borracha em Obras de Pavimentação. Tese de Doutorado.** – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2000. 251p.
- PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. **Módulos Resilientes de Concretos Asfálticos.** IPR, Rio de Janeiro-RJ, 1980, 51p.
- PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. **Pavimentação Rodoviária – Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis.** COPIARTE, Rio de Janeiro-RJ, 2001. 259p.
- REIS, R. M. M.; SANTO, N. R. E. **Uma Inovação Tecnológica para Tratamentos de Superfície – Micro Revestimento Asfáltico a Frio.** Ipiranga Asfaltos, 2000. 56p.

- SANTANA, H. **Manual de Pré-Misturados a Frio**. Instituto Brasileiro de Petróleo, Comissão de Asfalto, Rio de Janeiro-RJ, 1993. 298p.
- SANTOS, M. A. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Betuminosas a Frio via Ensaio de Laboratório. Tese de Mestrado** – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2002. 84p.
- SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**, Volume I, Editora PINI Ltda, São Paulo-SP, 1997. 746p.
- SENÇO W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. Volume II, Editora PINI Ltda, São Paulo-SP, 2001. 671p.
- SILVA, W. R. **Comportamento Mecânico de Pré-Misturado a Frio Denso Reforçado com Fibras Sintéticas. Tese de Mestrado** – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 1998. 91p.
- SOARES et al. **Método de Previsão do Teor Ótimo de Ligante em Misturas Asfálticas do Tipo CBUQ**. In: 32ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Volume I, Brasília-DF, 2000. p. 148 a 162.
- SOUZA, A. C. V. **Custos de Conservação de Rodovias, Velocidade de Tráfego e Módulos de Resiliência de Misturas Asfálticas. Tese de Doutorado**, - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro-RJ, 1997. 359p.
- SOUZA, M. L. **Pavimentação rodoviária**. Volume I, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro-RJ, 1980. 361p.
- TIA, M. **Bituminous Materials and Mixtures, Civil Engineering Handbook**, Second Edition, Chapter 45, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 2003, p 01 a 36.

VASCONCELOS, K. L. **Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometrias. Dissertação de Mestrado**, - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2004. 149p.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. John Wiley & Sons, New York, 1975. 711p.