

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**

**Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes**

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS  
ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE**

**André Theophilo Lima**

**Dissertação submetida ao programa de  
Mestrado em Engenharia de  
Transportes da Universidade Federal do  
Ceará, como parte dos requisitos para a  
obtenção do título de Mestre em  
Ciências (M.Sc.) em Engenharia de  
Transportes**

**ORIENTADOR: Profº Dr. Jorge Barbosa Soares**

**Fortaleza  
2003**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

LIMA, ANDRÉ THEOPHILO

Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente. Fortaleza, 2003.

XII, 99 fl., Dissertação (mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

1. Transportes – Dissertação

2. Misturas Asfálticas

3. Caracterização Mecânica

4. Reciclagem

CDD 388

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

LIMA, A. T. (2003) Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 99 fls.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: André Theophilo Lima

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente.

Mestre / 2003

É concedida à Universidade Federal do Ceará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

André Theophilo Lima  
Rua Tibúrcio Pereira, 341 Apt° 404, Bl. 08  
60864-260 – Fortaleza-CE – Brasil

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS  
RECICLADAS A QUENTE

André Theophilo Lima

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Aprovada por:

---

Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D  
(Orientador)

---

Prof.<sup>a</sup> Sandra de Aguiar Soares, D.Sc  
(Examinadora Interna)

---

Prof. José Afonso Gonçalves de Macedo, D.Sc.  
(Examinador Externo)

FORTALEZA, CE-BRASIL

SETEMBRO DE 2003

# DEDICATÓRIA

À minha esposa Ocilene, pelo amor e dedicação.  
Aos meus pais, Assis e Maroni (in memorian), que  
sempre investiram em minha formação.  
Aos meus filhos Andreza e André.

**DEDICO.**

## **AGRADECIMENTOS**

Quero externar os meus agradecimentos àqueles cuja colaboração possibilitou a realização desse trabalho.

Ao professor Jorge Barbosa Soares, pela orientação, dedicação, interesse e paciência demonstrados.

A todos os professores, funcionários e colegas do Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará.

A todos que fazem parte do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos.

E em especial aqueles que o convívio e a ajuda tornaram possível à realização desse trabalho de pesquisa. Aos meus amigos Márcio, Aldigueri, Kamila e Thiago.

Aos técnicos do laboratório de asfalto Clayton, Germano e Clemilson pelo inegável esforço despendido no dia-a-dia dos trabalhos no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos.

A PETROBRAS pelo apoio a pesquisa, através da LUBNOR e Cenpes.

A Agência Nacional de Petróleo-ANP, pelo suporte financeiro a nossa pesquisa.

A minha família a quem dedico este trabalho.

Resumo da Dissertação submetida ao PETRAN/UFC como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em Ciências (M.Sc.) em Engenharia de Transportes

## CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE

André Theophilo Lima

Setembro/2003

Orientador: Jorge Barbosa Soares

A reciclagem de revestimentos asfálticos é uma técnica efetiva e inovadora que vem sendo utilizada para renovar o pavimento. Este trabalho trata do comportamento mecânico em laboratório de misturas asfálticas recicladas e usinadas a quente. O método de dosagem utilizado foi o adotado pelo Asphalt Institute, tendo sido usado um ligante produzido pela PETROBRAS, oriundo do petróleo Bachaquero. Para a caracterização do ligante asfáltico novo, do ligante extraído/recuperado do revestimento fresado, foram utilizados os ensaios tradicionais baseados na penetração e viscosidade, e as especificações SUPERPAVE (SUPERior PERFORMANCE asphalt PAVEMENTS) desenvolvidas pelo programa SHRP (Strategic Highway Research Program). Este método representa um sistema aperfeiçoado para especificações de ligantes e agregados, para projeto e análise de misturas betuminosas e ainda para a previsão do desempenho de pavimentos. As misturas asfálticas foram dosadas sem a adição de material fresado, e com 10, 30 e 50% de adição de material fresado proveniente da Av. Eng. Santana Júnior em Fortaleza. Utilizou-se um agente rejuvenescedor para as misturas recicladas a base de petróleo, produzido pela LUBNOR conhecido comercialmente como AR-75. As misturas asfálticas recicladas tiveram as propriedades mecânicas; módulo de resiliência, resistência à tração e vida de fadiga determinadas em laboratório.

Abstract of thesis submitted to PETRAN/UFC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.) in Transportation Engineering

## MECHANISTIC CHARACTERIZATION OF RECYCLED HOT ASPHALT MIXTURES

André Theophilo Lima

Setembro/2003

Advisor: Jorge Barbosa Soares

Asphaltic pavement recycling is an effective and innovative technique that has been used for pavement restoration. The present work investigates the mechanical behavior of recycled hot asphaltic mixtures. The mixture design procedure used was the one adopted by the Asphalt Institute. The new binder was produced by PETROBRAS from the Venezuelan crude Bachaquero. For the characterization of both the new binder and the binder extracted and recovered from the recycled mixture, conventional tests such as penetration and viscosity were performed. These tests were performed along with the tests associated with the SUPERPAVE (Superior Performance Asphalt Pavements) specifications developed by the SHRP (Strategic Highway Research Program), an enhanced specification system for binders, aggregates, and mixture design based on pavement performance. Four different asphalt mixtures were analyzed in the study: without recycled material, with 10, 30 and 50% of recycled material from Washington Soares Avenue in Fortaleza. It was utilized a recycling agent (AR-75), produced by LUBNOR from a petroleum crude. The mixture mechanical properties determined in the laboratory were tensile strength, resilient modulus and fatigue life.

# SUMÁRIO

## CAPÍTULO 1

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1.1 PROBLEMA DE PESQUISA</b> .....	2
<b>1.2 OBJETIVOS</b> .....	3
1.2.1 Objetivos específicos .....	3

## CAPÍTULO 2

<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
<b>2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS</b> .....	4
<b>2.2 HISTÓRICO DA RECICLAGEM</b> .....	5
<b>2.3 MÉTODOS DE RECICLAGEM</b> .....	6
<b>2.4 ENVELHECIMENTO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS</b> .....	17
<b>2.5 EXTRAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE LIGANTES</b> .....	20
<b>2.6 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E REOLÓGICA DOS LIGANTES</b> .....	23
2.6.1 Ensaio de penetração .....	23
2.6.2 Ensaio de viscosidade .....	24
2.6.3 Ponto de amolecimento .....	26

<b>2.7 DOSAGEM DAS MISTURAS RECICLADAS</b> .....	30
2.7.1 Método de dosagem do <i>Asphalt Institute</i> .....	30
2.7.2 Método de dosagem Superpave .....	35
2.7.3 Método de dosagem proposto por Castro Neto (DERSA-SP).....	42
<b>2.8 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS</b> .....	43
2.8.1 Módulo de resiliência.....	44
2.8.2 Resistência à tração.....	45
2.8.3 Vida de fadiga.....	47
 <b>CAPÍTULO 3</b>	
<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	51
<b>3.1 MATERIAL FRESADO</b> .....	51
<b>3.2 AGREGADOS</b> .....	56
<b>3.3 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO</b> .....	62
<b>3.4 AGENTES REJUVENECEDORES-AR</b> .....	66
<b>3.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS RECICLADAS</b> .....	68

## **CAPÍTULO 4**

<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>69</b>
<b>4.1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>79</b>
4.1.1 Dosagem Marshall.....	79
4.1.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	80
4.1.3 Módulo de Resiliência.....	81
4.1.4 Vida de Fadiga.....	82
 <b>CAPÍTULO 5</b>	
<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>86</b>
<b>5.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....</b>	<b>89</b>
 <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>91</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Guia para seleção de métodos de reciclagem.....	16
Tabela 3.1: Determinação da graduação do material fresado.....	53
Tabela 3.2: Determinação da graduação dos agregados do material fresado pós-extração.....	54
Tabela 3.3: Teor de ligante do fresado.....	55
Tabela 3.4: Granulometria da areia de campo.....	57
Tabela 3.5: Granulometria da Brita 3/8”.....	57
Tabela 3.6: Granulometria da Brita 3/4”.....	58
Tabela 3.7: Densidades dos agregados.....	61
Tabela 3.8: Resultados de análises de amostras de CAP Bachaquero da LUBNOR.....	62
Tabela 3.9: Resultados da análise relativa às especificações SUPERPAVE de amostras de CAP Bachaquero da LUBNOR.....	64
Tabela 3.10: Características convencionais do ligante extraído do fresado.....	64
Tabela 3.11: Parâmetros SUPERPAVE do ligante extraído do fresado .....	65
Tabela 3.12: Características convencionais do CAP 50/60 .....	65
Tabela 3.13: Parâmetros SUPERPAVE do CAP 50/60.....	66
Tabela 3.14: Características dos três agentes rejuvenescedores.....	67
Tabela 4.1: Fracionamento realizado nos agregados virgens.....	71
Tabela 4.2: Granulometria da faixa C (DNER).....	73
Tabela 4.3: Densidades máximas teóricas.....	75
Tabela 4.4: Teor de projeto e parâmetros volumétricos das misturas.....	75

Tabela 4.5: Parâmetros da dosagem Marshall.....	76
Tabela 4.6: Resultados dos ensaios de RT.....	77
Tabela 4.7: Resultados dos ensaios de MR.....	78
Tabela 4.8: Resultados dos ensaios de MR, RT e da relação MR/RT.....	78

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Representação esquemática de uma usina de asfalto vertical ( <i>Batch plant</i> )..	9
Figura 2.2: Representação esquemática de uma usina de asfalto do tipo <i>Drum mixer</i> ...	10
Figura 2.3: Reciclagem a quente <i>in situ</i> com fresagem a quente.....	12
Figura 2.4: Reciclagem a quente <i>in situ</i> com fresagem a frio.....	13
Figura 2.5: Fresagem a frio em vias urbanas.....	14
Figura 2.6: Reciclagem com fresagem profunda ( <i>full depth</i> ).....	15
Figura 2.7: RTFOT .....	19
Figura 2.8: PAV .....	19
Figura 2.9: Rotarex.....	21
Figura 2.10: Aparelho de extração e recuperação de asfalto.....	23
Figura 2.11: Equipamento para ensaio de penetração.....	23
Figura 2.12: Viscosímetro Saybolt-Furol.....	24
Figura 2.13: Representação esquemática do viscosímetro <i>Cannon-Manning</i> .....	25
Figura 2.14: Aparelho para determinação do ponto de amolecimento.....	26
Figura 2.15: DSR - <i>Dynamic Shear Rheometer</i> .....	28
Figura 2.16: Viscosímetro rotacional. ....	28
Figura 2.17: BBR - <i>Bending Beam Rheometer</i> .....	29
Figura 2.18: Fluxograma de dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente.....	31
Figura 2.19: Gráfico de viscosidade versus porcentagem de ligante novo.....	34
Figura 2.20: Compactador giratório SUPERPAVE.....	35
Figura 2.21: Esquema do ensaio de tração indireta em amostra cilíndrica .....	46

Figura 2.22: Equipamento de ensaio de compressão diametral de cargas repetidas.....	49
Figura 2.23: Simulador de tráfego.....	50
Figura 3.1: Fresagem na Av. Eng. Santana Júnior.....	51
Figura 3.2: Estocagem do fresado.....	52
Figura 3.3: Gráfico da granulometria dos agregados do material fresado.....	53
Figura 3.4: Gráfico da granulometria das amostras de fresado pós-extração do ligante.....	54
Figura 3.5: Gráfico comparativo das distribuições granulométricas do material fresado e de seus agregados pós-extração do ligante.....	55
Figura 3.6: Local de coleta dos agregados (Pedreira comercial de Itaitinga).....	56
Figura 3.7: Gráfico da distribuição granulométrica dos agregados novos.....	58
Figura 3.8: Gráfico da distribuição granulométrica do filer.....	59
Figura 3.9: Gráfico da distribuição granulométrica do pó-de-pedra.....	59
Figura 3.10: Esferas para o ensaio de abrasão Los Angeles.....	60
Figura 3.11: Equipamento Los Angeles.....	60
Figura 3.12: Amostra coletada do CAP 50/60 (LUBNOR).....	62
Figura 3.13: Amostras dos AR's 75, 250, 500 produzidos na LUBNOR.....	66
Figura 4.1: Corpos de prova moldados para a definição do teor de projeto.....	74
Figura 4.2: Equipamento para a determinação da DMT.....	74
Figura 4.3: Mistura preparada para determinação do DMT.....	75
Figura 4.4: Detalhe de um corpo de prova rompido no ensaio de RT.....	77
Figura 4.5: Ensaio de MR.....	78
Figura 4.6: Ensaio de fadiga.....	78

Figura 4.7: Gráfico de vida de fadiga para mistura I.....	79
Figura 4.8: Gráfico de vida de fadiga para mistura II.....	80
Figura 4.9: Gráfico de vida de fadiga para mistura III.....	80
Figura 4.10: Gráfico de vida de fadiga para mistura IV.....	81
Figura 4.11: Gráfico dos valores de RT.....	82
Figura 4.12: Gráfico de MR e MR/RT para misturas recicladas.....	84
Figura 4.13: Gráfico comparativo de vida de fadiga para as misturas estudadas.....	85

## **LISTA DE ABREVIações**

AASHTO ; American Association of State Highway and Transportation Officials

AR ; Agente Rejuvenecedor

ARRA; The Asphalt Recycling and Reclaiming Association

ASTM ; American Society for Testing and Materials

BBR ; Bending Beam Rheometer

CBUQ ; Concreto Betuminoso Usinado a Quente

DC ; Deformação controlada

DERSA-SP ; Desenvolvimento Rodoviário S.A.

DDT ; Direct Tension Test

DNER ; Departamento Nacional de Estradas e Rodagem

DMT ; Densidade Máxima Teórica

DSR ; Dynamic Shear Rheometer

FHWA ; Federal Highway Administration

IDT ; Indirect Tensile Tester

LUBNOR ; Lubrificantes do Nordeste

LVDT ; Linear Variable Differential Transformer

MR ; Módulo de Resilência

PAV ; Pressure Aging Vessel

PETROBRAS ; Petróleo Brasileiro S.A.

PG ; Performance Grade

PMF ; Pré-Misturado a Frio

RBV ; Relação Betume-Vazios

RTFOT ; Rolling Thin Film Oven Test

RT ; Resistência a Tração

RVT ; Rotational Viscometer

SHRP ; Strategic Highway Research Program

SST ; Superpave Shear Tester

SUPERPAVE ; Superior Performance Asphalt Pavements

TC ; Tensão Controlada

USACE ; United States Army Corps of Engineers

VAM ; Vazios no Agregado Mineral

V<sub>v</sub> ; Volume de Vazios

## LISTA DE SÍMBOLOS

N ; Número de passadas do eixo padrão simples em uma só direção  
°C ; Grau Celsius  
kPa ; kilopascal  
kg ; kilograma  
kgf ; kilograma-força  
ml ; Mililitro  
MPa ; Megapascal  
Rpm ; Rotações por minuto  
g ; Grama  
mm ; Milímetro  
SSF : Segundo Saybolt-Furol  
 $G^*$  ; Módulo de cisalhamento complexo  
 $\delta$  ; Ângulo de fase  
 $\delta_r$  ; Deslocamento resiliente  
 $G'$  ; Componente elástica (recuperável) do módulo de cisalhamento complexo  
 $G''$  ; Componente viscosa (não recuperável) do módulo de cisalhamento complexo  
Hz ; Hertz  
# ; Abertura de peneira  
S ; Rigidez estática  
m ; Logarítimo do módulo de relaxação  
Dmm ; Décimo de milímetro  
P ; Poise  
cSt ; CentiStoke  
 $\mu$  ; Coeficiente de Poison  
 $\sigma_t$  ; Tensão de tração

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A qualidade dos pavimentos rodoviários é bastante influenciada pelo tipo de revestimento. Uma caracterização mais adequada dos materiais utilizados na pavimentação, além de possibilitar o desenvolvimento de novos produtos asfálticos, permite o uso de técnicas alternativas de pavimentação na manutenção de rodovias. A reciclagem de pavimentos asfálticos apresenta-se como alternativa de alta atratividade econômica, permitindo o aproveitamento de até 70% dos CAP's (Cimento Asfáltico de Petróleo) envelhecidos (*Asphalt Institute*, 1986), embora se tenha comumente usado quantidades variando no intervalo de 20 a 50% (Kennedy et al., 1998), chegando em certos casos a 80% da mistura asfáltica (FHWA, 1993). Com a reciclagem permite-se manter e/ou corrigir o greide na forma original do projeto do pavimento. A questão da diminuição dos impactos ambientais é um dos fatores levados em consideração já que não há descarte de materiais do pavimento envelhecido e uma menor exploração de jazidas e pedreiras.

Durante a vida de um pavimento, o CAP do revestimento envelhece por oxidação. Essa oxidação ocorre com maior velocidade nas camadas superficiais, onde existe uma maior exposição a elementos que alteram as características do ligante (Roberts et al., 1996). O efeito da temperatura e das demais condições climáticas nos pavimentos asfálticos causa seu envelhecimento que leva a um enrijecimento da mistura betuminosa. Com o passar do tempo, o asfalto se torna mais duro e quebradiço até chegar a um ponto em que é preciso fazer a recuperação do revestimento.

A reciclagem é uma técnica efetiva e inovadora que vem sendo utilizada para renovar o pavimento. Pode ser efetuada a frio ou a quente através de adições ao material fresado, de emulsões rejuvenescedoras ou CAP's com ou sem agentes rejuvenescedores. Os agentes rejuvenescedores (AR's), também conhecidos como rejuvenescedores de asfaltos oxidados, são ricos em maltenos, produtos existentes no asfalto e perdidos no

processo de oxidação. Os AR's devolvem ao ligante oxidado as características de um ligante novo restaurando-lhes as propriedades reológicas originais (Capudi et al., 1990), enquadrando-os nas especificações e tendo como objetivo melhorar ou recuperar a durabilidade do material reciclado. No caso de reciclagem a quente, o material depois de fresado é remisturado e tratado termicamente com adição de ligantes e/ou AR's, com ou sem correção granulométrica.

As misturas asfálticas com material reciclado têm mostrado um desempenho similar, e em alguns casos superiores as misturas asfálticas convencionais, quando se comparam as suas principais propriedades mecânicas (módulo de resiliência, resistência à tração e vida de fadiga). A caracterização mecânica destas misturas asfálticas são feitas pelos ensaios de compressão diametral de carga repetida (DNER-ME 133/94), tração estática (DNER-ME 138/94) e vida de fadiga.

O presente trabalho está desenvolvido de acordo com a seguinte seqüência: além deste primeiro capítulo de introdução e que contém ainda os objetivos da pesquisa, o trabalho apresenta uma revisão bibliográfica com uma ampla lista de referências bibliográficas relacionada no final do trabalho. No terceiro capítulo é feita uma descrição da caracterização dos materiais utilizados na mistura asfáltica reciclada e dos métodos adotados nos ensaios realizados. No quarto capítulo mostra-se o procedimento de dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente e os detalhes dos ensaios mecânicos realizados. Finaliza-se o trabalho apresentando e comentando os resultados alcançados na pesquisa e as respectivas conclusões.

## **1.1 PROBLEMA DA PESQUISA**

A qualidade dos pavimentos rodoviários é bastante influenciada pelo tipo de revestimento. Uma caracterização mais adequada das misturas usadas em revestimentos, além de possibilitar o desenvolvimento de novos produtos asfálticos, permite o uso de técnicas alternativas de pavimentação na manutenção de rodovias.

A reciclagem de pavimentos asfálticos, a exemplo da reciclagem de qualquer outro material, tem se mostrado uma exigência do mundo contemporâneo sobretudo em

termos de uma consciência ambiental mais desenvolvida, além de trazer repercussões econômicas e sociais.

No estado do Ceará não se tem notícia do uso destas técnicas para reciclagem e aplicação como um novo revestimento, utilizando uma dosagem racional e uma caracterização moderna baseada no desempenho para os ligantes novos e envelhecidos extraídos do revestimento existente. A caracterização mecânica destas misturas recicladas avaliada através de ensaios estáticos como a resistência à tração, e ensaios com cargas repetidas para determinação do módulo de resiliência e vida de fadiga, torna esta pesquisa pioneira para o estado do Ceará.

## **1.2 OBJETIVOS**

O objetivo geral deste trabalho é verificar o comportamento mecânico de uma mistura asfáltica reciclada a quente do tipo concreto betuminoso (CBUQ), dosada com material fresado proveniente de uma avenida urbana de Fortaleza, agregados virgens e ligantes asfálticos utilizados na região, indicando o seu potencial para ser reutilizado como um novo revestimento.

### **1.2.1 Objetivos específicos**

A presente dissertação tem como objetivos específicos testar experimentalmente em laboratório as propriedades mecânicas medidas através dos ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração e vida de fadiga de corpos de prova de misturas asfálticas recicladas a quente, dosadas com diferentes proporções de material fresado recuperado de revestimentos asfálticos antigos.

Testar um novo tipo de agente rejuvenescedor derivado de petróleo e fabricado pela Lubrificantes do Nordeste (LUBNOR). Definir o tipo e a quantidade deste agente rejuvenescedor, verificando a sua potencialidade para devolver as propriedades originais da mistura envelhecida.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Na revisão bibliográfica houve a intenção de abranger os tópicos relacionados com a reciclagem de pavimentos, de modo a possibilitar uma melhor compreensão do que é esta técnica, quais as metodologias comumente utilizadas tanto para execução, como para o projeto da mistura. Abordou-se também os ensaios necessários para a caracterização de todos os materiais envolvidos, e os principais ensaios de caracterização mecânica da mistura pronta, objetivo maior deste trabalho.

#### **2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

A reciclagem de pavimentos é uma técnica de reabilitação onde toda, ou parte da camada do pavimento existente, é reaproveitada na construção de uma nova camada, incorporando ou não novos materiais, permitindo assim obter um pavimento com características semelhantes ou superiores ao pavimento antigo.

As vantagens da utilização da técnica da reciclagem na conservação de vias vão desde a economia de materiais, até a preservação do meio ambiente. Com a diminuição do consumo dos materiais asfálticos, de alto valor comercial, e dos materiais agregados, há uma diminuição dos custos das obras. A reciclagem contribui para a preservação ambiental, uma vez que evita a exploração agressiva das áreas de exploração, ocasionada pela redução da área de exploração de jazidas. Estima-se atualmente que cerca de 27 milhões de toneladas de ligante asfáltico e meio bilhão de toneladas de agregados sejam consumidos a cada ano na construção e manutenção de rodovias nos Estados Unidos (Peterson et al., 1994). O reuso de parte desse material poderia eliminar grande quantidade de descarte do material removido proveniente do pavimento antigo, resolvendo um grande e antigo problema, que é a disposição final destes materiais em locais inadequados, geralmente ao longo do corpo estradal, nos casos de vias rurais, e em locais distantes das obras, nos aterros sanitários nas grandes cidades, nos casos das vias urbanas. Evitam-se assim impactos ambientais negativos ao meio ambiente.

Outras vantagens do uso da reciclagem de pavimentos estão relacionadas à economia de energia em relação as tradicionais técnicas de construção de pavimentos, a manutenção do perfil geométrico existente, evitando a sobreposição de revestimentos que alteram o greide da via, a preservação de boa parte dos dispositivos de drenagens superficiais durante os serviços de reconstrução do pavimento existente, a correção de defeitos superficiais no revestimento, e a possibilidade de correção do perfil transversal e/ou longitudinal de uma via sem a necessidade de intervenção nas camadas do pavimento. Da mesma forma, podem ser evitados problemas relacionados com a altura livre em passagens inferiores de túneis e viadutos devido aos recapeamentos sucessivos.

Finalmente, a reciclagem permite também uma diminuição no tempo de execução das obras de restauração de vias, diminuição essa que, dependendo da escolha do tipo de reciclagem, pode ser bastante conveniente principalmente nas vias urbanas.

## **2.2 HISTÓRICO DA RECICLAGEM**

O uso das técnicas de reciclagem de pavimentos asfálticos data do início do século passado, mais precisamente por volta de 1915 (Kandhal, 1997). O uso do CAP na reciclagem de pavimentos é anterior aos anos 30, quando apareceram as primeiras máquinas de fresagem nos Estados Unidos, desenvolvidos por um empreiteiro de Utha (Terrel et al., 1997).

No início dos anos 30, Taylor (1978) relata a execução da reabilitação de pavimentos em Singapura, usando a reciclagem com desempenho acima das expectativas, tendo sua vida útil variado entre 25 e 30 anos.

Em 1948, Taylor novamente utiliza com sucesso a reciclagem de pavimentos em Bombay na Índia, com a vida do pavimento reciclado durando em torno de 30 anos (Taylor, 1978). No início dos anos 60, na Europa, particularmente na então Alemanha Ocidental, apareceram os primeiros trabalhos significativos com a reciclagem de pavimentos, que devido ao seu sucesso logo chegaram a outros países da Europa e América do Norte (Alvim, 1999).

O grande aumento do uso da técnica da reciclagem aconteceu na primeira metade da década de 70, por ocasião do conflito Árabe-Israelense, onde o embargo do petróleo produzido no oriente Médio proporcionou uma disparada no preço do produto (Kandhal, 1997). No período de 1975 até o final dos anos 90 o volume de pavimentos reciclados superou todas as reciclagens executadas entre os anos de 1915 e 1975 (Terrel et al., 1997, apud Epps, 1980).

No Brasil, as primeiras experiências foram realizadas na década de 70, na Via Anhanguera em São Paulo sob a responsabilidade do Dersa-SP. Os primeiros serviços de fresagem urbana foram executados na cidade de São Paulo nos anos 1984/1985, e os primeiros testes de reciclagem em usinas do tipo *Drum-Mixer* em 1984, também na cidade de São Paulo (Alvim, 1999).

O primeiro serviço bem sucedido de reciclagem de pavimento no Estado do Ceará que se teve notícia foi a reciclagem do pavimento da Ce-282, no trecho compreendendo as cidades de Icó e Iguatu, realizado em 1999. Neste trecho utilizou-se a técnica de reciclagem do revestimento incorporando-o a camada de base existente e adicionando novos materiais (brita) (Soares et al., 1999). Em Fortaleza as primeiras fresagens de vias na área urbana, foram feitas sob a responsabilidade da prefeitura municipal e ocorreram no ano de 2001 utilizando uma máquina fresadora (Soares et al., 2002).

### **2.3 MÉTODOS DE RECICLAGEM**

Ao longo dos anos, desde o seu aparecimento, a reciclagem tem se mostrado como uma boa alternativa de reabilitação de pavimento. Diferentes métodos de reciclagem foram desenvolvidos especificamente para a situação do pavimento existente.

A associação de reciclagem asfáltica dos Estados Unidos (*The Asphalt Recycling and Reclaiming Association-ARRA*), define cinco categorias principais de diferentes métodos de reciclagem (Kandhal, 1997):

- Reciclagem a frio (*Cold planning*);
- Reciclagem a quente (*Hot recycling*);
- Reciclagem a quente in situ (*Hot in-place recycling*);
- Reciclagem a frio in-situ (*Cold in-place recycling*);
- Reciclagem de camadas do pavimento (*Full depth reclamation*).

É importante notar a diferença entre reciclagem e fresagem. A reciclagem de pavimento é uma técnica de restauração, enquanto a fresagem do pavimento é uma operação onde o pavimento, ou parte dele, é cortado através de um equipamento dotado de um cortador giratório empregando movimento rotativo. A fresagem pode ser feita a frio ou a quente. Dá-se o nome de termo-reperfilagem quando o revestimento é aquecido e compactado para corrigir a deformação nele existente, e o termo regeneração quando há aquecimento do revestimento, seguido de escarificação e nivelamento (Alvim, 1999).

#### *Reciclagem a frio*

A reciclagem a frio utiliza a técnica da fresagem na qual o pavimento asfáltico é removido a uma profundidade desejada e depois restaurado através da confecção de uma nova camada superficial. Este método permite a correção do greide da pista, inclinação, ondulações e deformações na camada superficial. Permite também a possibilidade de se corrigir problemas de rugosidade superficial, melhorando o atrito entre a superfície de rolamento e os pneus dos veículos. A reciclagem a frio utiliza máquinas autopropelidas para fresar as camadas do pavimento, dotadas de um cortador giratório que corta o pavimento a uma espessura pré-determinada (*Asphalt Institute*, 1989).

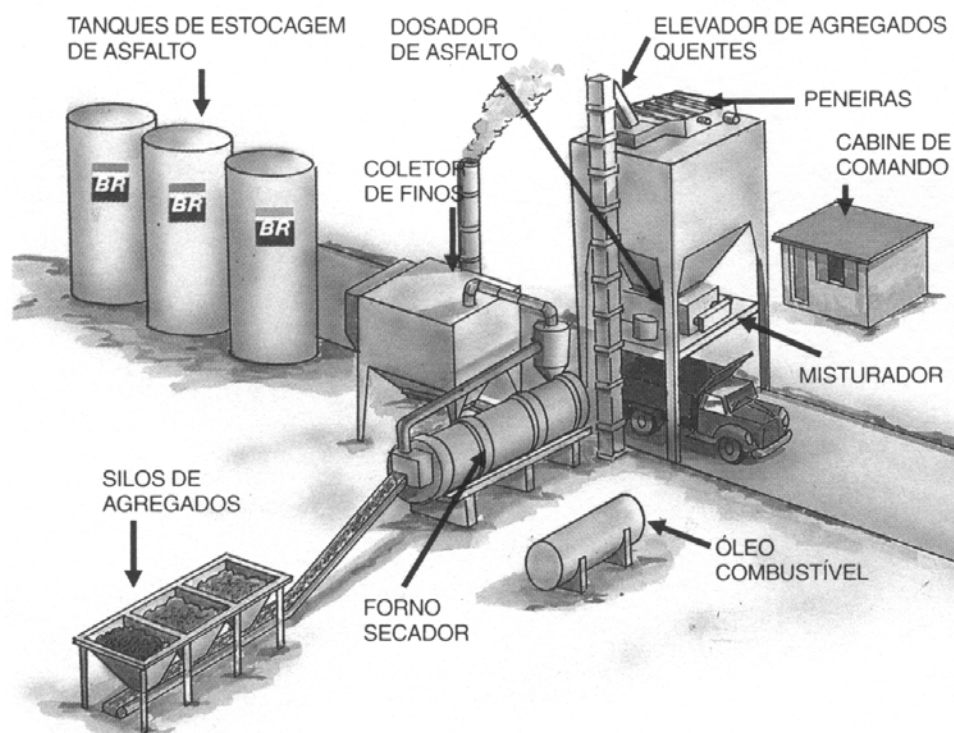
## *Reciclagem a quente*

A reciclagem a quente consiste no método no qual o pavimento asfáltico existente é removido por intermédio de uma fresadora ou outro equipamento capaz de arrancar a camada superficial total ou parcialmente a uma profundidade previamente estabelecida que é depois transportada para um local de estocagem para que seja reciclada em usina.

São utilizados dois tipos de usinas para a reciclagem do asfalto removido. Usinas do tipo gravimétricas ou verticais (*Batch Plants*) (Figura 2.1) e usinas horizontais (*Drum Mixer*) (Figura 2.2) (Asphalt Institute, 1986). As usinas gravimétricas consistem basicamente de um depósito para armazenar os agregados, um secador para retirar a umidade dos mesmos, um depósito para o material fresado, um elevador para transportar o material para a parte superior da torre, onde os mesmos serão separados através de peneiras vibratórias. Os agregados aquecidos e separados granulometricamente são descarregados dentro de um depósito, onde a correta proporção de cada agregado é determinada por peso e misturado com o asfalto (e AR, se for o caso) na proporção estabelecida no projeto de mistura dentro do *pugmill* (misturador). O tempo de mistura é de aproximadamente 25 a 30 segundos, tempo necessário para que o AR se disperse na mistura, já que entre outras coisas o desempenho da mistura reciclada depende; da eficiência de como o agregado virgem e o ligante (asfalto + AR) são misturados com o material fresado, e da forma com que o agregado é envolvido por este ligante. A distribuição do AR na mistura reciclada é função do tempo com que ela é executada (Lee et al., 1983). Quando a mistura está completada, a parte inferior do *pugmill* é aberta e a mistura asfáltica reciclada é descarregada dentro da carroceria do veículo de transporte. O material fresado pode ser adicionado aos novos agregados em três locais diferentes na usina, no fundo do elevador, nos depósitos aquecidos dos agregados dentro da torre ou, como é mais comum, no depósito alimentador para pesagem (*weigh hopper*) (USACE, 2000).

A quantidade de material fresado a ser adicionada à mistura reciclada depende de três fatores: teor de umidade, temperatura desejada para a mistura asfáltica, e temperatura dos agregados novos previamente aquecidos. Se a temperatura do material

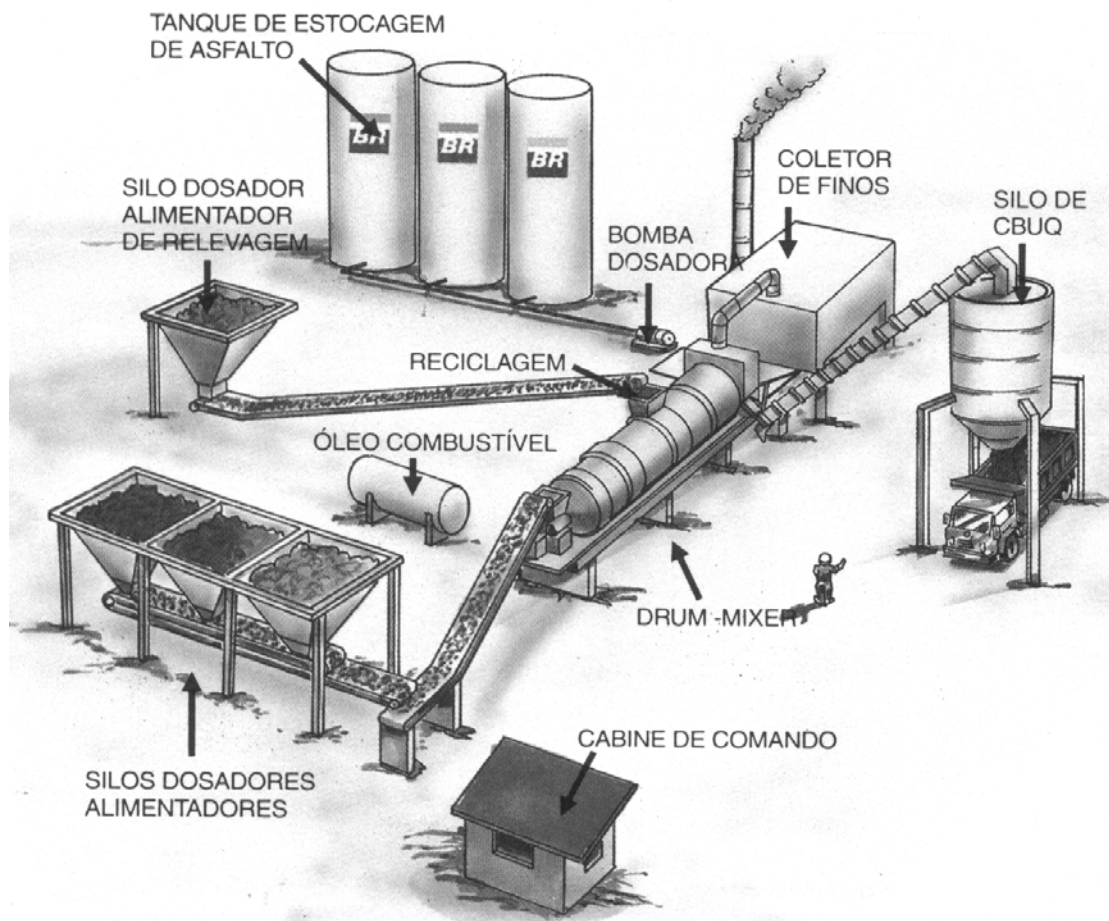
fresado for próxima à temperatura ambiente, e se o seu teor de umidade for mínimo, é possível utilizar 50% de material fresado na nova mistura asfáltica reciclada, utilizando-se este tipo de usina (*Asphalt Institute*, 1986).



**Figura 2.1:** Representação esquemática de uma usina de asfalto vertical (*batch plant*). Cortesia PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A.

As usinas do tipo *Drum Mixer* possuem cinco componentes principais: depósitos para estocagem dos agregados; tanque de suprimento de asfalto; tambor misturador; silos de armazenagem da mistura pronta e equipamento de controle de emissões poluentes. Os materiais agregados estocados são dosados conforme o projeto de mistura e transportados através de esteiras até o tambor onde se dá o aquecimento necessário para a mistura atingir aproximadamente 175°C. Uma usina convencional do tipo *Drum Mixer* possui um sistema de fluxo paralelo, ou seja, os gases da exaustão e os agregados movem-se dentro do tambor na mesma direção. O material fresado incorpora-se à mistura na porção média do tambor por intermédio de correia transportadora do local onde está estocado até o colar adaptado no tambor para essa finalidade. A entrada do material fresado na porção média do tambor é para evitar que o mesmo não sofra um

super aquecimento, aumentando a emissão de hidrocarbonetos no fenômeno chamado de *Blue Smoke*. Após a mistura do agregado com o fresado no interior do tambor, adiciona-se asfalto novo e agente rejuvenescedor (se for o caso) na parte final do tambor misturador. Com a mistura pronta transporta-se a mesma até os silos de armazenagem, de onde são abastecidos os veículos transportadores da mistura (USACE, 2000). Usinas do tipo *Drum Mixer* permitem que sejam aproveitados até 70% de material fresado na mistura reciclada (Asphalt Institute, 1986).



**Figura 2.2:** Representação esquemática de uma usina de asfalto do tipo *Drum Mixer*.

Cortesia PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A.

As técnicas de aplicação e compactação de misturas asfálticas recicladas são as mesmas empregadas para as misturas convencionais. The *Federal Highway*

*Administration* (FHWA) apresentou os resultados das pesquisas feitas em 17 estados norte-americanos sobre o desempenho de misturas asfálticas recicladas, realizadas no período compreendido entre 1992 e 1995. Esta pesquisa mostrou que aproximadamente 33% dos pavimentos asfálticos fresados são reciclados (FHWA, 1996). O consenso destes estados foi de que misturas asfálticas recicladas possuem desempenho igual, ou melhor, que as misturas asfálticas convencionais, desde que projetadas e produzidas adequadamente. Kandhal et al. (1995), Paul (1996) e Decker (1997) nos seus estudos sobre pavimentos reciclados nos estados da Geórgia e Louisiana (Estados Unidos) respectivamente, mostraram não haver diferenças significativas no desempenho entre misturas recicladas e convencionais, após alguns anos de uso. Estudos semelhantes feitos por Hossain no sudoeste do Arizona, onde foram analisados parâmetros de rugosidade da camada de superfície, resistências à derrapagem e dados de trincamento mostraram desempenho semelhante (Hossain et al., 1993).

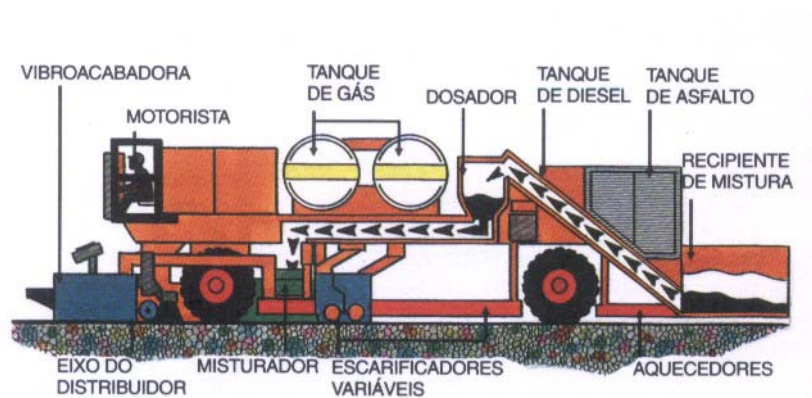
Solaimanian e Tahmoresi (1995), pesquisando misturas asfálticas recicladas recém aplicadas, com teores de fresado variando entre 35% a 50%, encontraram grande variação na granulometria, volume de vazios e estabilidade, comparados com revestimentos asfálticos convencionais também recém aplicados.

### *Reciclagem a quente in situ*

A reciclagem de misturas asfálticas a quente realizada *in situ* é definida como um processo de correção da superfície do pavimento asfáltico. Consiste na remoção mecânica da superfície asfáltica, através de aquecimento e conseqüente amolecimento (fresagem a quente). Esta superfície é então misturada com o ligante asfáltico, agregados virgens, e agentes rejuvenescedores (Figura 2.3). Após este processo, a mistura reciclada é recolocada sobre o pavimento remanescente.

A reciclagem a quente *in situ* pode ser feita com uma operação de uma passagem única do equipamento reciclador, que combina o pavimento restaurado com materiais virgens, ou com dupla passagem onde o material reciclado é recompactado, seguido da aplicação de uma nova mistura asfáltica (Terrel et al., 1997). Existem três

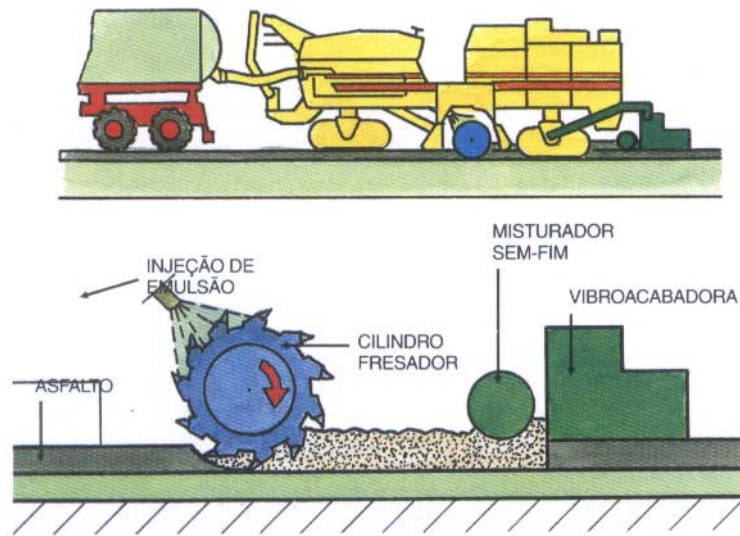
processos básicos de reciclagem a quente *in situ*: (i) Escarificação com aquecimento (*Heater-scarification*), no qual o pavimento é aquecido, escarificado, rejuvenescido, nivelado, reperfilado e compactado; (ii) Repavimentação (*Repaving*), onde é utilizado o mesmo procedimento citado acima, com a adição de uma nova camada de mistura asfáltica de pouca espessura sobre a superfície reciclada; (iii) *Remixing*, processo similar aos anteriores, porém com um aquecimento mais efetivo, permitindo a colocação de revestimento mais espesso, e uma melhoria no revestimento velho com correções na granulometria do agregado ou ajustes nas propriedades do ligante.



**Figura 2.3:** Reciclagem a quente *in situ* com fresagem a quente. Cortesia de WIRTGEN DO BRASIL LTDA

#### *Reciclagem a frio in situ*

A reciclagem a frio *in situ* é a reabilitação do revestimento existente utilizando-se normalmente asfalto emulsionado a temperatura ambiente, para produzir uma nova camada asfáltica com características semelhantes a uma nova mistura pré-misturada a frio (PMF) conforme indica a Figura 2.4. O processo consiste basicamente da execução da fresagem do revestimento asfáltico existente a uma determinada profundidade adicionando-se emulsão asfáltica, aditivos, espalhando-a e compactando-a em seguida com o uso de um equipamento apropriado (trens de reciclagem). A espessura máxima alcançada com este tipo de reciclagem varia normalmente entre 75 a 100 mm.



**Figura 2.4:** Reciclagem a frio com fresagem a frio. Cortesia de WIRTGEN DO BRASIL LTDA

As reciclagens a frio *in situ* têm sido indicadas para vias rurais e urbanas (Figura 2.5), com baixos e altos volumes de tráfego (Kearney, 1997). Esta técnica foi aplicada com sucesso em trechos da rodovia BR 393/RJ, para um tráfego considerado pesado ( $N = 1,8 \times 10^7$ ) (Pinto et al., 1994). A técnica de reciclagem a frio *in situ* também se mostrou mais econômica que outros tipos de reciclagem, principalmente por eliminar a necessidade de aquecimento da mistura, e diminuir bastante o custo com o transporte de material, uma vez que somente o agente rejuvenescedor será transportado. Hoje em dia no Brasil utiliza-se basicamente este tipo de reciclagem, quando se indica reciclagem a frio.



**Figura 2.5:** Fresagem a frio em via urbana

### *Reciclagem de camadas do pavimento*

Finalmente a reciclagem incorporando as camadas do pavimento, com a camada asfáltica do revestimento, com ou sem adição de novos materiais, produzindo uma nova camada de base estabilizada tem sido indicada na reabilitação de pavimentos deteriorados. Esta técnica nada mais é que uma variação do método de reciclagem a frio, diferenciando-se deste pelo fato de se incorporar diferentes tipos de aditivos tais como: cal hidratada; cimento, agregados, emulsões, agentes químicos (p/ex. polímeros e fibras sintéticas), etc. Estes aditivos têm por finalidade dotar o pavimento velho de características físicas apropriadas a um pavimento novo (Araújo et al., 2001). Estudos realizados por Soares et al. (1999, 2000) mostram que a incorporação de brita as camadas de base tem quase sempre aumentado o desempenho à resistência a deformação permanente, porem não indicando necessariamente aumento de módulo de resiliência.

O método de reciclagem com incorporação de material, geralmente atinge profundidades entre 250mm (Huffman et al., 1997) e 305mm (Kandhal, 1997) (Figura 2.6). A principal vantagem deste tipo de reciclagem é a possibilidade de se corrigir defeitos estruturais no pavimento, especialmente nas camadas abaixo do revestimento, afora todas as outras vantagens dos métodos citados anteriormente.



**Figura 2.6:** Reciclagem com fresagem profunda (*Full Depth*)

A escolha do método de reciclagem a ser adotado para a reabilitação de pavimentos, depende dos tipos de defeitos que o mesmo apresenta, a extensão e a severidade dos mesmos. Baseados em defeitos de superfície, deformações, trincamentos, correção de afundamentos do tipo trilha-de-roda, problemas nas camadas de base/subbase, e problemas relacionados à rugosidade da superfície de rolamento, The Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA) recomenda a Tabela 2.1 como guia para a escolha da alternativa de reciclagem (Kandhal, 1997; Huffman, 1997). Os números sobrescritos referem-se às observações colocadas após a tabela.

**Tabela 2.1:** Guia para seleção de métodos de reciclagem

TIPOS DE DEFEITOS NO PAVIMENTO	RECICLAGEM				
	a frio	a quente	a quente <i>in situ</i>	a frio <i>in situ</i>	Rec. rofunda <i>(full depth<sup>1</sup>)</i>
Defeitos de superfície					
Desintegração	X	X	X <sup>2</sup>		
Exsudação	X	X	X <sup>5</sup>		
Escorregamento	X	X	X <sup>2</sup>		
Deformação					
Corrugação	X <sup>5</sup>	X	X <sup>5</sup>		
Afundamento de trilha de roda-superficial <sup>3</sup>	X <sup>5</sup>	X	X <sup>5</sup>		
Afundamento de trilha de roda-profundo <sup>4</sup>		X		X <sup>6</sup>	X <sup>6,7</sup>
Trincas-associada ao carregamento					
Couro de jacaré		X		X	X
Longitudinal-trilha de roda		X	X <sup>8</sup>	X	X
Borda do pavimento		X		X	X
Trincamento parabólico		X	X <sup>9</sup>		
Trincas-não associadas ao carregamento					
Trincas de bloco		X		X	X
Trincas longitudinal-juntas		X	X <sup>10</sup>		
Transversal (térmica)		X		X	X
Reflexão de trincas		X		X	X
Manutenção de remendo					
Spray		X <sup>11</sup>			X
Superfície		X <sup>11</sup>			X
Panelas-buraco		X			X
Profundo (mistura a quente)		X			X
Problemas Base/Sub base					X
Qualidade da pista de rolam./Aspereza					
Irregularidades gerais	X	X	X		
Depressões (assentamento)	X <sup>12</sup>	X <sup>12</sup>	X <sup>12</sup>		X <sup>13</sup>
Manchas (excessiva)	X <sup>12</sup>	X <sup>12</sup>	X <sup>12</sup>		X <sup>14</sup>

Observações:

- (1) Pavimento no qual a mistura asfáltica é usada para todas as camadas acima do subleito, ou para melhorar a subbase com agentes modificadores.
- (2) Aplicável se a espessura da superfície do revestimento não exceder 3,8 cm (1,5”).
- (3) Deformação limitada à parte de cima da estrutura do pavimento 3,8 a 5,0 cm (1,5 a 2,0”).

- (4) Deformação originada na porção mais baixa do pavimento (abaixo da camada de superfície e incluindo base e sub-base).
- (5) Correção temporária, se a camada afetada não for tratada por adição de mistura asfáltica especial.
- (6) A adição de novos materiais pode ser requerida para misturas instáveis.
- (7) A estabilização química da subbase pode ser necessária se o solo for mole ou úmido.
- (8) Aplicável se o trincamento for limitado à camada de superfície do pavimento.
- (9) Aplicável se o tratamento for para uma profundidade abaixo da camada onde o trincamento em forma de lua estiver ocorrendo.
- (10) Aplicável se o trincamento for limitado à camada de superfície do pavimento.
- (11) Em algumas ocasiões o *spray* e o remendo de superfície podem ser removidos por fresagem antes deste tratamento (considerando alto teor de asfalto, exsudação).
- (12) Pode ser somente uma correção temporária se o defeito relatado for um problema de sub base.
- (13) Usado se as depressões são devidas às condições de solo mole ou úmido na sub base.
- (14) Usado se as manchas são causadas por congelamento excessivo ou inchamento de solos expansivos na subbase.

## 2.4 ENVELHECIMENTO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A durabilidade de uma mistura asfáltica pode ser definida como a sua habilidade em manter as propriedades reológicas, coesão e a adesão ao longo do tempo de serviço. Entre os principais fatores que afetam a durabilidade de um revestimento asfáltico, podemos citar os endurecimentos oxidativo, evaporativo e exsudativo.

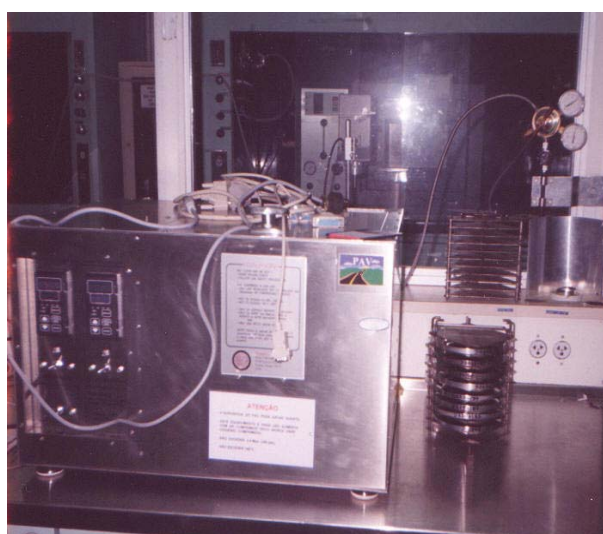
O endurecimento oxidativo é considerado como a principal causa do envelhecimento dos asfaltos, embora o envelhecimento devido à evaporação dos componentes mais voláteis dos betumes possa ser também bastante significativo. O primeiro envelhecimento do CAP se dá ainda durante a usinagem, onde os agregados aquecidos são misturados com o cimento asfáltico aumentando a sua viscosidade e diminuindo a penetração, devido à oxidação pelo contato com o ar, e a perda de voláteis (Roberts et al., 1996). O envelhecimento prossegue durante as fases de estocagem, aplicação e compactação da mistura asfáltica na pista, embora com menos intensidade. Depois disso o envelhecimento se processa lentamente ao longo da vida útil do revestimento, até que o mesmo adquira uma rigidez excessiva, que facilita o trincamento por fadiga. Traxler (1963), citado por Roberts et al.(1996), sugeriu diversos fatores adicionais para o envelhecimento dos asfaltos: efeitos da luz, água, reações químicas com os agregados, deterioração microbiológica e absorção dos componentes pesados do asfalto na superfície dos agregados. O envelhecimento oxidativo durante o tempo de serviço de um revestimento asfáltico pode ser acelerado devido à influência de uma alta taxa de vazios da mistura, permitindo uma maior circulação de ar, água e luz.

Existem dois métodos de ensaios que simulam o envelhecimento dos asfaltos: durante a mistura e ao longo da sua vida útil. O primeiro, chamado de *Rolling Thin Film Oven Test - RTFOT* (ASTM D2872) simula o envelhecimento por oxidação e evaporação durante a produção e execução da mistura asfáltica. O ensaio é feito colocando-se uma quantidade específica de cimento asfáltico (35g) numa jarra, que gira dentro de uma estufa a 163°C. Por intermédio de um orifício aberto na jarra, uma corrente de ar atinge a mistura a cada rotação da placa rotativa com as jarras. O ensaio dura 75 minutos (Figura 2.7).



**Figura 2.7:** RTFOT

O segundo ensaio para simular o envelhecimento do ligante é o *Pressure Aging Vessel* - PAV (ASTM D454) (Figura 2.8). Este ensaio simula o envelhecimento do ligante durante a vida em serviço da mistura (5-10 anos), e é feito colocando-se o resíduo proveniente do RTFOT à alta pressão e temperatura por 20 horas no vaso de pressão (Migliore e Corté, 1998). Este vaso opera a pressão de 2.070 kPa e temperaturas de 90°, 100° e 110°C.



**Figura 2.8:** PAV

## 2.5 EXTRAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS

Para obter as propriedades do asfalto presente em uma amostra, ou determinar o seu teor, utilizam-se procedimentos para a extração do ligante, separando-o dos agregados com o uso de solventes e posteriormente recuperando-o dessa mistura. Os solventes usados na extração devem ser adequadamente removidos evitando que haja distorções nas propriedades físicas que se deseja medir.

O ponto crucial nas dosagens de reciclados a quente é a extração do ligante envelhecido. É aqui que se encontra a maior dificuldade em utilizar um método de extração e recuperação do ligante envelhecido, sem que ele altere as propriedades do ligante.

O procedimento mais utilizado para a extração de asfalto de misturas betuminosas é o preconizado pela norma americana ASTM D2172 (extração de asfalto de misturas betuminosas). Este procedimento determina cinco modalidades para a extração do betume.

O Método A (extração por centrifugação) e o método B (extração por refluxo) são os mais comumente usados; os métodos C e D são variações do método B, e não são muito usados. O método E é a extração de asfalto a vácuo, que não foi amplamente difundido. O fato de que o método de extração por refluxo causar um aumento no envelhecimento do asfalto (Burr et al., 1990) levou-nos a opção pela a escolha do uso do método de extração por centrifugação (método A).

O método de extração de asfalto por centrifugação consiste em colocar o material asfáltico dentro de um aparelho denominado *rotarex* (Figura 2.9), que possui uma cuba metálica cilíndrica acoplada a um motor que a faz girar. O solvente é adicionado dentro do cilindro e iniciado o processo de centrifugação, separando o asfalto dos agregados.



**Figura 2.9:** Rotarex

Existem dois métodos usados para a recuperação de asfalto: (i) recuperação de asfalto da solução pelo método de Abson (ASTM D1856), e (ii) recuperação de asfalto usando o aparelho denominado Rotavapor (ASTM D5404) Figura 2.10. O método mais utilizado para se recuperar o ligante da mistura asfáltica é o método de Abson, que utiliza uma aparelhagem de destilação denominada *sox-let*. Este método baseia-se em colocar um balão cheio de solvente (benzeno, tetracloreto de carbono, ou tricloroetileno) que aquecido, é evaporado para dentro de um instrumento, onde se encontra o material a ser extraído, o ligante. Esse aparelho permite que o vapor suba por um tubo até a parte mais alta do mesmo, entrando em contato com um condensador, que faz com que o solvente precipite sobre o material, lavando-o. Através de um tubo capilar ligado ao instrumento, permite que o solvente circule, lavando a amostra várias vezes até que o extrato que circula pelo tubo capilar seja transparente, isto é não tenha mais betume a ser extraído. O problema de se utilizar este método para se recuperar o ligante reside na dificuldade da completa remoção do solvente e evitar que o ligante não venha a ser oxidado.

Devido ao elevado grau de toxicidade do tricloroetileno, existe uma tendência atual pela substituição desse solvente por solventes alternativos não tóxicos (p/ ex. NEUGENIC 4175), ou a utilização de outros procedimentos, como a queima do asfalto do fresado convertendo-o em dióxido de carbono e água (*ignition oven*), sendo ambos

mais seguros e menos poluentes (Behrens et al., 1999). Garcia et al. (2000), investigaram o uso do solvente n-Propil Brometo (marca registrada: Ensolv) e concluíram que este solvente poderia substituir o tricloroetileno nos processos de extração por refluxo com a vantagem de poder ser reutilizado em novas operações de extração.

Pesquisas indicaram que a recuperação de asfaltos pelo método de Abson possuía um grande coeficiente de variação, na ordem de 25 a 42% para a viscosidade absoluta do ligante asfáltico recuperado (Peterson et al., 1999). Segundo Cipione et al. (1991) as causas prováveis desta variação seriam: a reação do ligante asfáltico com o solvente que alteraria as propriedades físicas do ligante recuperado, a presença de solvente residual após o processo de recuperação que também alteraria suas propriedades físicas, e a não completa extração do ligante asfáltico do agregado, deixando asfalto fortemente adsorvido, influenciando significativamente a densidade aparente do agregado recuperado.

Durante o programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*), pesquisadores tentando diminuir esse problema, desenvolveram um método quantitativo para a extração e recuperação de ligante asfáltico de misturas asfálticas a quente, designado por AASHTO TP2 (Burr et al., 1993). Este novo procedimento consiste na utilização do aparelho Rotovapor (ASTM D5404) (Figura 2.10), e um tambor para a extração com filtros de alumínio no seu interior. Para começar a extração, 1 kg da amostra do revestimento e 600 ml de tolueno ou tricloroetileno são colocados no tambor de extração. O tambor é girado a uma rotação de 30 rpm durante 05 minutos, após o qual é colocado em um frasco com o material proveniente da primeira filtragem no tambor. Este material filtrado é então submetido a uma nova filtragem para remover as partes finas tanto quanto possível. O produto dessa segunda filtragem é transferido para o rotovapor. Enquanto o solvente é destilado, o tambor extrator é carregado com 400 ml de solvente e girado por mais 15 minutos e repete-se a seqüência para uma segunda lavagem. A segunda lavagem ocorre similarmente as anteriores, a exceção do tempo de mistura no tambor, que é de 30 minutos. Após a destilação da terceira lavagem, o frasco com o material recuperado é removido. Um outro frasco é anexado ao rotovapor para as lavagens subseqüentes. Para a quarta e posterior lavagem é usado tolueno ou

tricloroetileno com 15% de etanol. Quando o fluxo da extração atingir uma coloração marrom clara o processo estará concluído.



**Figura 2.10:** Aparelho de extração e recuperação de asfalto.

## **2.6 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E REOLÓGICA DOS LIGANTES**

Existem dois métodos para a caracterização física e reológica dos ligantes novos e envelhecidos. O primeiro chamado de convencional baseado na penetração, viscosidade e ponto de amolecimento, e o segundo denominado SUPERPAVE, baseado no desempenho do material.

### **2.6.1 Ensaio de Penetração**

A caracterização reológica do ligante é feita verificando-se a consistência do CAP medida através do ensaio de penetração a 25° C (Figura 2.11), onde uma agulha padronizada (100 g) penetra numa amostra de CAP por 5 segundos. A dureza de um CAP é inversamente proporcional à penetração da agulha, e tem se notado uma progressiva diminuição da penetração com o tempo em misturas envelhecidas (Roberts et al., 1996). O ensaio de penetração tem sido largamente utilizado devido a sua simplicidade de execução.



**Figura 2.11:** Equipamento para ensaio de penetração

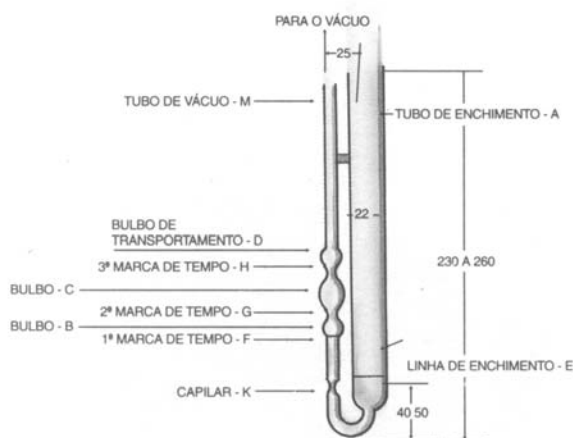
### 2.6.2 Ensaio de Viscosidade

Outro ensaio de consistência do CAP é o de viscosidade. Existem vários métodos para a determinação da viscosidade, sendo no Brasil o mais utilizado o Saybolt-Furol (Figura 2.12), que consiste em um tubo de dimensões e formas padronizadas, com um orifício de diâmetro 3,15 mm. O tubo com o material a ser ensaiado é colocado em banho com óleo e com o orifício fechado. Quando a temperatura atingir 135° C, abre-se o orifício e inicia-se a contagem de tempo. Quando o líquido alcança a marca de 60 ml, o valor da viscosidade é relacionado ao tempo necessário para que o líquido atinja esta marca, sendo dado em segundos Saybolt-Furol (SSF).



**Figura 2.12:** Viscosímetro Saybolt-Furol

Chama-se viscosidade absoluta aquela viscosidade medida usando-se um líquido viscoso perfeitamente aderente a duas placas paralelas de vidro, com uma distância  $D$  entre as placas, e onde se aplica uma tensão tangencial na placa superior durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ , adquirindo uma velocidade  $V$  em relação a uma placa inferior (fixa). Este movimento (fricção) produz um gradiente para a velocidade do fluido ( $\Delta V/D$ ) proporcional a força externa sobre a área de contato ( $F/A$ ). A viscosidade é a capacidade do fluido de resistir ao escoamento, devido ao atrito formado entre as camadas. A viscosidade pode ser medida também a partir de tubos capilares sendo chamada de viscosidade cinemática. A temperatura especificada para a determinação da viscosidade absoluta (Cannon-Manning) (Figura 2.13) é de  $60^\circ\text{C}$ , escolhida por se aproximar da temperatura da superfície de um CBUQ durante os meses de verão nos Estados Unidos. A temperatura especificada para a viscosidade cinemática é igual a  $135^\circ\text{C}$  por aproximar a temperatura de mistura e execução usadas na construção de pavimentos asfálticos.



**Figura 2.13:** Representação esquemática do viscosímetro a vácuo Cannon-Manning (ASTM D2171). Cortesia PETROBRÁS DISTRIBUIDORA S.A.

### 2.6.3 Ponto de Amolecimento

O ensaio para a determinação do ponto de amolecimento é utilizado para a determinação da temperatura em que o ligante asfáltico torna-se fluido. Utiliza-se neste ensaio o procedimento conhecido como “anel e bola” (Figura 2.14), que consiste em

colocar o ligante dentro de um anel metálico de dimensões padronizada com 15,8 mm de diâmetro e 6,4 mm de altura, enchendo-o completamente. Em seguida coloca uma esfera de 3,4 a 3,55 Kg e diâmetro de 9,35 mm no anel preenchido com o ligante. Coloca-se o conjunto anel e bola dentro de um Becker com etilenoglicol de forma que fiquem a 25,4mm do fundo do Becker. Aquece o conjunto a uma taxa de 5°C por minuto. Anota-se a temperatura em que o ligante se distende até tocar o fundo, esta temperatura será o ponto de amolecimento do ligante.



**Figura 2.14:** Ensaio para determinação do ponto de amolecimento (anel e bola)

As propriedades físicas e reológicas do CAP, medidas pelos métodos correntes já citados têm algumas limitações (Robert et al., 1996) tais como: (i) o ensaio de penetração é totalmente empírico, não levando em consideração o desempenho do revestimento betuminoso, sendo feito à temperatura padronizada, diferente das temperaturas encontradas nos revestimentos em diversas áreas geográficas com condições climáticas adversas; (ii) não são levados em conta os envelhecimentos das misturas asfálticas ao longo do tempo; (iii) as especificações, uma vez que os ligantes podem ter características diferentes mesmo pertencendo à mesma categoria (penetração ou viscosidade); (iv) os métodos de ensaios foram desenvolvidos com base na experiência, não se aplicando, por exemplo, a asfaltos modificados com polímeros ou borracha moída.

#### 2.6.4 Caracterização SUPERPAVE

Um novo sistema de especificações para ligantes asfálticos, agregados e misturas asfálticas foi desenvolvido nos Estados Unidos, pelo programa de pesquisa SHRP denominado SUPERPAVE, baseado no desempenho dos materiais, especificando os mesmos com base no clima e na temperatura do pavimento (SHRP, 1994a, 1994b; Motta et al., 1996). Estabeleceu-se com estas novas especificações, o grau de desempenho dos ligantes (PG - *Performance Grade*), como por exemplo, PG 64-22, onde o primeiro número, 64, chamado de "grau a alta temperatura", significa que o mesmo possui propriedades físicas adequadas até 64° C (temperatura mais elevada do pavimento que se espera que o ligante resista). Do mesmo modo o número (-22), chamado de "grau a baixa temperatura", significa que o ligante possui propriedades físicas compatíveis com a temperatura do pavimento até -22° C. Também são feitas algumas considerações relativas ao volume de tráfego e tempo de aplicação de cargas para especificar o ligante (Motta et al., 1996).

As propriedades físicas dos ligantes são medidas segundo as especificações SUPERPAVE, através de quatro aparelhos: reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR - *Dynamic Shear Rheometer*), viscosímetro rotacional (RVT - *Rotacional Viscometer*), também denominado viscosímetro Brookfield, reômetro de fluência em viga (BBR - *Bending Beam Rheometer*), e prensa de tração direta (DDT - *Direct Tension Tester*).

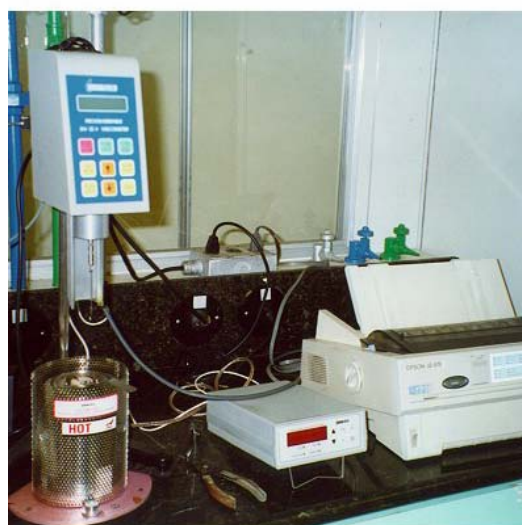
O DSR é usado na determinação de parâmetros viscoelásticos do ligante a temperaturas elevadas e intermediárias. O equipamento mede o módulo complexo de cisalhamento ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ) a temperaturas e frequência de carregamentos desejadas. O parâmetro  $G^*$  tem um componente elástico recuperável ( $G'$ ) e um componente viscoso não recuperável ( $G''$ ). A componente elástica é relacionada à energia total armazenada durante o carregamento, ou seja, a cada ciclo de ensaio, enquanto que a componente viscosa é relacionada à energia perdida através da fluência ou deformação. O DSR (Figura 2.15) baseia-se na prensagem de um ligante entre uma placa fixa e outra giratória. Um torque é aplicado girando a placa de um ponto A para um ponto B, em seguida para um ponto C, enfim retornando para o ponto A.

A frequência utilizada no ensaio é de 1,59 Hz.



**Figura 2.15:** DSR - *Dynamic Shear Rheometer*

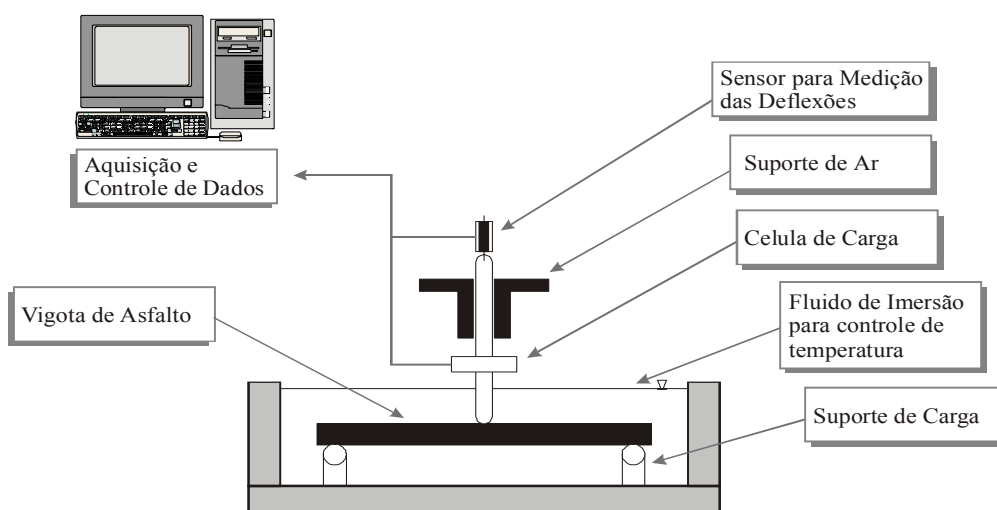
O viscosímetro rotacional (ASTM D4402) (Figura 2.16) é utilizado para a determinação da viscosidade do CAP a temperaturas acima de 100° C. A viscosidade é medida através de um torque necessário para rodar uma palheta (*spindle*) imersa na amostra de asfalto quente, a velocidade constante. A viscosidade é determinada medindo o torque necessário para manter a palheta imersa na amostra quente de asfalto a uma velocidade constante de 20 rpm. Aquece-se uma amostra com 30 g de CAP, porem somente 11 g são utilizadas no ensaio.



**Figura 2.16:** Viscosímetro rotacional

O reômetro de fluência de viga (Bending Beam Rheometer-BBR) (Figura 2.17) é utilizado na verificação da susceptibilidade do CAP ao trincamento térmico a baixas temperaturas de serviços. O ensaio consiste em carregar uma viga de CAP em dimensões padronizadas, mantida em banho com uma mistura de etileno, glicol, metanol, e água. Mede-se a deflexão da viga através de um sistema de aquisição de dados e calculam-se dois parâmetros: rigidez em função do tempo, e taxa da variação da rigidez com o tempo.

O ensaio de tração direta (DDT) é indicado para os asfaltos duros e dúcteis. Uma viga em formato de osso de cachorro é submetida a carregamentos nas suas extremidades a uma taxa constante de 1mm/min. O asfalto é submetido antes aos ensaios de simulação de envelhecimento (RTFOT e PAV). A resposta desse ensaio é a tensão de deformação na fratura, medido a partir do estiramento da amostra de ligante, a baixa temperatura, até que a mesma se rompa (Motta et al., 1996). O DDT assegura a maximização da resistência de ruptura do ligante a baixa temperatura.



**Figura 2.17:** Representação esquemática do BBR - *Bending Beam Rheometer*  
(Adaptada de Roberts et al., 1996)

## **2.7 DOSAGEM DAS MISTURAS RECICLADAS**

A maioria dos procedimentos de dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente segue uma metodologia baseada na consistência do ligante envelhecido para a determinação do teor de ligante novo e/ou agente rejuvenescedor de acordo com a norma ASTM D4887.

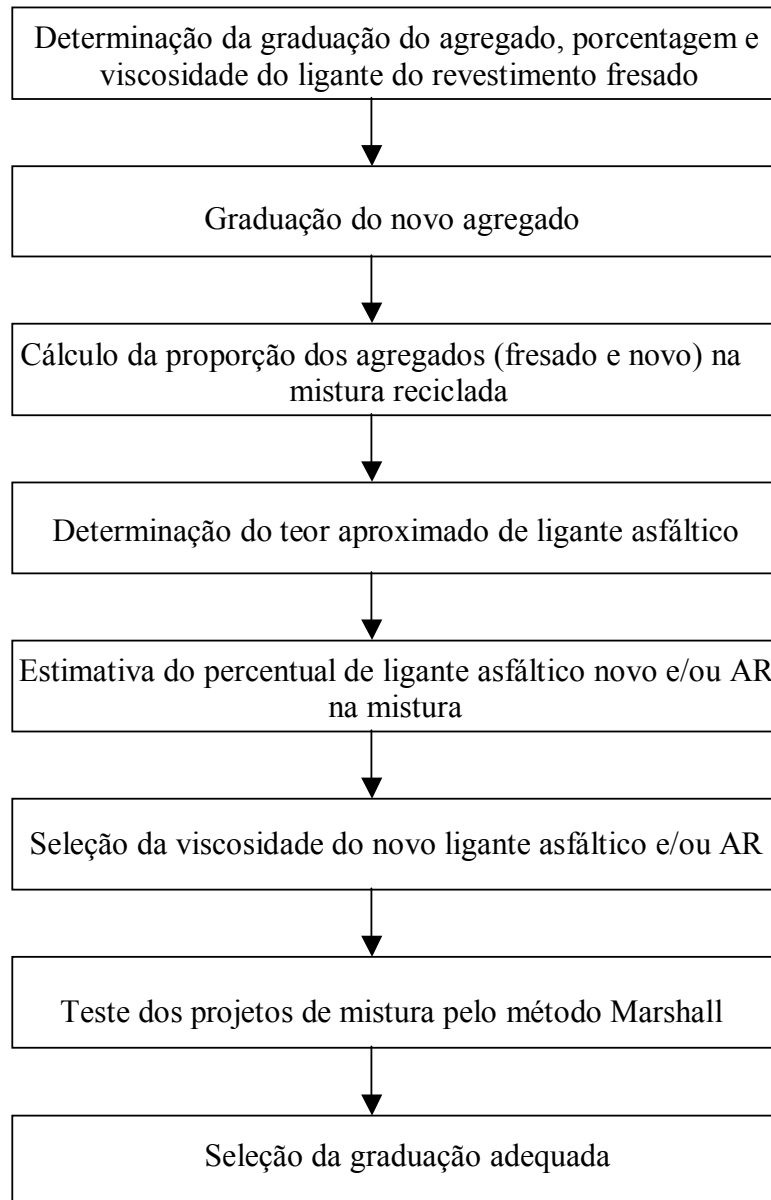
As etapas preliminares para a dosagem de uma mistura asfáltica são comuns, independentes do método que se venha a utilizar. Estas etapas consistem de um plano de amostragem para coleta de material, determinação da granulometria do material fresado, com e sem asfalto, determinação do teor e da viscosidade do ligante envelhecido, propriedades físicas dos ligantes novos e do material agregado.

Existem várias propostas para a dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente. As mais utilizadas são as do *Asphalt Institute* (1986), e a metodologia SUPERPAVE proposta por um grupo de pesquisadores sob a responsabilidade do FHWA, conhecido como *Superpave Mixtures Expert Task Group* desenvolvida para misturas asfálticas para a inclusão de material fresado. No Brasil, Castro Neto (2000) desenvolveu uma nova proposta para dosagem de misturas recicladas a quente, no qual parâmetros mecânicos são usados para a determinação do teor de projeto de ligantes rejuvenescidos.

### **2.7.1 Método de Dosagem do *Asphalt Institute***

O procedimento de dosagem do *Asphalt Institute* utiliza tanto o método Marshall, como o método Hveem de dosagem de misturas asfálticas convencionais, acrescentando alguns procedimentos para a análise dos agregados e material fresado visando o enquadramento da granulometria da mistura em uma das faixas requeridas nas especificações de projeto, e a avaliação do ligante envelhecido para a determinação da demanda de ligante novo e/ou agente rejuvenescedor, se necessário.

O método de dosagem foi desenvolvido para a indicação de misturas asfálticas em que a proporção de material fresado varie de 10 a 70% (Asphalt Institute, 1986). O procedimento de dosagem segue as etapas indicadas na Figura 2.18 e discutidas adiante.



**Figura 2.18:** Fluxograma de dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente

(1) Determinação da composição granulométrica da mistura reciclada. Determina-se a granulometria dos agregados do material fresado após a extração do asfalto, dos agregados novos que serão incorporados à nova mistura; determina-se a

proporção agregados recuperados/agregados novos que fará parte da nova mistura enquadrando nas faixas granulométricas especificadas. Determina-se o teor de asfalto no material fresado, e a viscosidade a 60°C (ASTM D2171).

(2) Determinação aproximada da demanda de asfalto. Calcula-se a quantidade de asfalto necessária pelo uso da seguinte fórmula empírica:

$$P_b = 0,035a + 0,045b + Kc + F \quad (2.1)$$

Onde:

$P_b$ : demanda aproximada de asfalto total para a mistura reciclada em porcentagem de peso da mistura;

a: percentual do agregado mineral retido na peneira #2,36mm (nº8);

b: percentual de agregado mineral passando na peneira #2,36mm (nº8) e retido na peneira #0,075mm (nº 200);

c: percentual de agregado mineral passando na peneira #0,075mm (nº200);

K: constante, função da quantidade de material que passa na peneira #0,075mm (nº 200), poderá assumir os seguintes valores:

- $K = 0,15$  para 11-15% passando na peneira nº 200
- $K = 0,18$  para 6-10% passando na peneira nº 200
- $K = 0,20$  para 5% ou menos passando na peneira nº 200

F: fator de absorção dos agregados com valores entre 0 e 2%. Na falta de outros dados utilizar 0,7%.

(3) Estimativa do percentual de ligante novo na mistura. A quantidade de asfalto novo que deverá ser adicionado à mistura reciclada é expressa como porcentagem do peso total da mistura e calculada pela seguinte fórmula:

$$Pnb = \frac{(100^2 - rPsb)Pb}{100(100 - Psb)} - \frac{(100 - r)Psb}{100 - Psb} \quad (2.2)$$

Onde:

Pnb: Percentual de asfalto novo na mistura reciclada;

r: Percentual em peso de agregado novo na mistura reciclada;

Pb: Demanda aproximada de asfalto total para a mistura reciclada em porcentagem de peso da mistura;

Psb: Teor de asfalto do material fresado em porcentagem.

(4) Seleção da consistência do asfalto novo. Determina-se a porcentagem de asfalto a ser incorporado na mistura, em relação à quantidade total de asfalto da mesma:

$$R = \frac{100Pnb}{Pb} \quad (2.3)$$

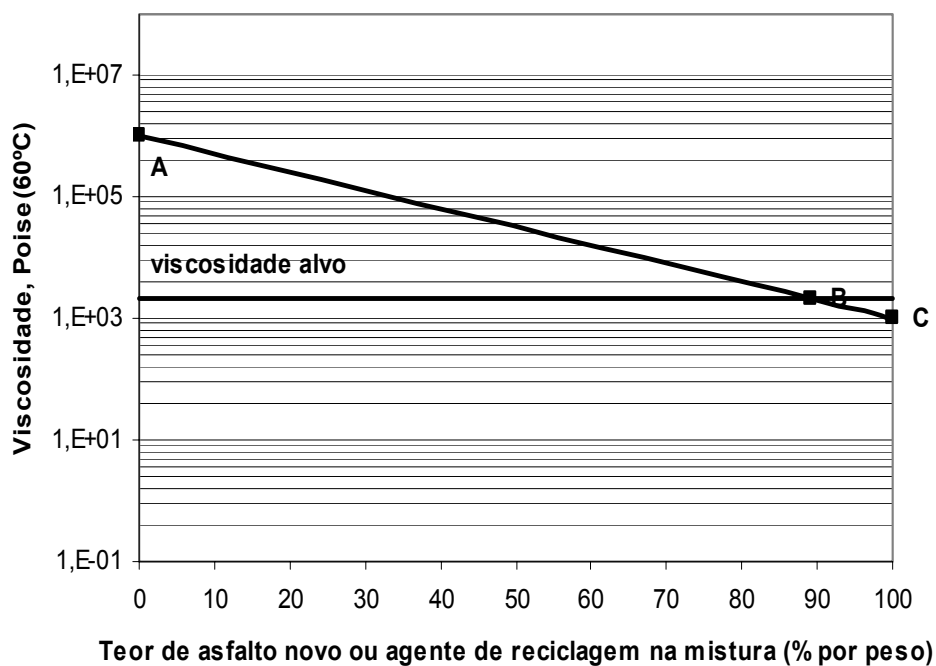
A consistência do asfalto novo é determinada utilizando um gráfico log-log de viscosidade versus porcentagem de asfalto novo (*blending chart*). A viscosidade da mistura do asfalto recuperado com o asfalto novo (e/ou agente rejuvenescedor) é selecionada, sendo comumente escolhida segundo a *Asphalt Institute* como 2000 Poise, que é um valor intermediário da faixa de viscosidade de um asfalto novo (CAP 20). Em seguida coloca-se a viscosidade do asfalto recuperado (ponto A) no eixo Y do gráfico (Figura 2.19), desenha-se uma linha vertical representando o ponto da porcentagem do asfalto novo, determinado pela equação 3, e determina-se a interseção desta linha com a linha horizontal que representa a viscosidade requerida para a mistura (2000 Poise), ponto B. Então traça-se uma reta ligando o ponto A ao ponto B e estende-a até

interceptar a escala do gráfico a direita, no ponto C. O ponto C será a viscosidade a 60°C do novo asfalto, requerida para a mistura com o asfalto recuperado do pavimento fresado, para se obter uma viscosidade na mistura total definida como 2000 Poise. A consistência do novo asfalto será aquela que tiver um intervalo que inclua, ou se aproxime da viscosidade encontrada no ponto C.

(5) Realiza-se a dosagem da mistura pelos métodos convencionais (Marshall ou Hveem).

(6) Determina-se o teor de projeto da mistura conforme método de dosagem escolhido.

Para as misturas asfálticas recicladas onde a porcentagem de fresado incorporado seja inferior a 20%, o *Asphalt Institute* sugere que a consistência do asfalto a ser usado na mistura reciclada seja a mesma consistência usada para as misturas convencionais, dispensando a determinação da viscosidade do asfalto extraído/recuperado.



**Figura 2.19:** Viscosidade versus porcentagem de ligante novo (*blending chart*)

## 2.7.2 Método de Dosagem SUPERPAVE

Durante o programa SHRP (1987 a 1993) foram propostos três níveis de projeto para dosagem de misturas asfálticas. Estes níveis foram numerados de um a três em ordem crescente de complexidade de acordo com a importância do pavimento projetado (Kennedy et al., 1993). O nível de projeto um, para número N menor que  $10^6$ , foi baseado em desempenho empírico relacionado aos agregados e propriedades das misturas, ou seja, parâmetros volumétricos que incluem: teor de vazios, vazios do agregado mineral, vazios preenchidos com asfalto. A seleção do material asfáltico foi feita de acordo com o grau de desempenho (PG) e a compactação dos corpos de prova utilizando o compactador giratório SUPERPAVE (Figura 2.18).



**Figura 2.20:** Compactador giratório SUPERPAVE

Os agregados minerais receberam uma maior atenção, embora nenhum ensaio novo fosse criado, foram propostos ensaios para determinar as propriedades ditas de consenso, ou seja, propriedades resultantes do consenso entre os pesquisadores quanto à

especificação do valor e da sua utilização (angularidade dos agregados graúdo e miúdo, lameralidade, teor de argila), e as propriedades de origem, definidas como propriedades que dependem da origem dos materiais (dureza, sanidade, e materiais deletérios). Para a definição da granulometria, as especificações SUPERPAVE modificaram a abordagem tradicional, criando zonas de restrições e pontos de controles para a curva granulométrica. As zonas de restrições foram criadas ao longo da linha de densidade máxima, entre os tamanhos de abertura de peneiras variando entre 0,3mm a 2,36mm ou 4,75mm dependendo do tamanho nominal máximo do agregado (abertura de peneira correspondente à abertura maior a abertura que reter mais que 10% da mistura do agregado). Note que estas zonas de restrições serviram como recomendações e não como especificações a serem seguidas. Alguns pesquisadores questionam a necessidade da zona de restrição, quando a mistura asfáltica atende as propriedades volumétricas nos seus três níveis de compactação (inicial, projeto e máximo). Kandhal e Cooley Jr. (2001) analisaram várias misturas asfálticas utilizando dois agregados de granulometrias graúdas diferentes, dez agregados de granulometrias finas e um mesmo ligante asfáltico, chegando a conclusão de que misturas asfálticas dentro dos padrões volumétricos citados acima e com as suas angularidades finas dentro das especificações SUPERPAVE, mas que violaram a zona de restrição, tiveram desempenhos similares ou superiores que aquelas misturas asfálticas que tiveram as suas granulometrias passando por fora das zonas de restrições.

O nível de projeto dois, adotado para locais onde o número N está compreendido entre  $10^6$  e  $10^7$ , baseia-se em parâmetros volumétricos e teste de previsão de desempenho. Com o projeto de mistura nível dois, informações adequadas são obtidas para especificar o desempenho do pavimento usando princípios fundamentais da mecânica dos materiais. Esse modelo proporciona especificações limites para previsões de deformações permanentes, trincas por fadiga e trincas de retração a baixa temperatura com o tempo. Dois novos equipamentos foram desenvolvidos para a previsão do desempenho das misturas asfálticas, *Superpave Shear Tester* (SST) e *Indirect Tensile Tester* (IDT) (Kennedy et al., 1993).

O projeto de mistura nível três, similar ao nível dois, oferece um nível de previsão de desempenho mais confiável, embora englobe os procedimentos dos outros

dois níveis, são realizados testes adicionais com o SST e IDT com uma faixa mais ampla de temperatura (SHRP 1994a, 1994b; Motta et al., 1996).

O programa SHRP, embora inovador quanto ao tratamento dado ao ligante asfáltico e aos projetos de mistura asfálticas, não fez nenhuma menção ao uso de reciclados asfálticos nos projetos de mistura. Somente alguns anos após o lançamento das novas especificações é que pesquisadores, sentindo a necessidade da utilização de materiais asfálticos reciclados em novos projetos, passaram a se preocupar com o desenvolvimento de uma nova sistemática para a dosagem de reciclados a luz das novas especificações SUPERPAVE.

Assim em meados dos anos 90 o FHWA criou um grupo de estudo denominado *SUPERPAVE Mixtures Expert Task Group* com a finalidade de desenvolver procedimentos para o uso de reciclados usando a tecnologia SUPERPAVE. Este grupo sugeriu a criação de três faixas para enquadrar a quantidade de material fresado a ser incorporado na mistura reciclada: Faixa I até 15% de reciclado por peso total da mistura Faixa II para valores acima de 15% até 25% de reciclado por peso total da mistura,. Faixa III para valores acima de 25% de reciclado por peso total da mistura (Kandhal e Foo, 1997; Bukowski, 1997 ; Anderson et al., 2001).

Kandhal e Foo (1997) desenvolveram um procedimento para seleção do ligante virgem (PG) baseado nas especificações SUPERPAVE. Eles propuseram a utilização de gráficos de misturas, similares ao gráfico de mistura do *Asphalt Institute*, baseado na viscosidade. Os gráficos de mistura SUPERPAVE determinam o valor requerido da temperatura do ligante reciclado para que ele adquira uma determinada rigidez à temperatura especificada. Nos gráficos propostos por esses dois pesquisadores a proporção entre o ligante recuperado e o ligante novo ou agente rejuvenescedor é grafado no eixo X, enquanto o valor da temperatura no eixo Y. Nesses gráficos foi assumida uma relação linear entre  $\log(\log G^*/\text{sen}\delta)$  e a porcentagem de ligante asfáltico virgem. Os pontos da curva traçada representam as possíveis combinações dos valores da temperatura e o percentual de ligante asfáltico virgem ao qual o parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  é igual a 1 kPa (máxima quantidade de ligante asfáltico virgem na mistura reciclada).

Kennedy et al. (1998), investigando o efeito da incorporação de diferentes porcentagem de ligantes reciclados no desempenho da mistura reciclada a alta, intermediária e baixa temperatura, propuseram um novo procedimento para a determinação da porcentagem ótima de reciclado utilizando as especificações SUPERPAVE. Segundo Kennedy e seus co-autores, na maioria dos casos, o PG requerido para a mistura é conhecido. Realizam-se então os ensaios na composição ligante virgem e ligante envelhecido a quatro diferentes porcentagens para determinar o comportamento da mistura. Os seguintes ensaios SUPERPAVE são propostos: DSR (original), DSR (após RTFOT), DSR (após PAV) e BBR (após PAV). A seguir desenha-se um gráfico  $G^*/\sin\delta$  versus porcentagem de ligante virgem a temperatura correspondente ao PG escolhido. A porcentagem de ligante virgem determinada será aquela correspondente ao valor do  $G^*/\sin\delta$  igual 1kPa. Faz-se outro gráfico agora para a mistura envelhecida no RTFOT, com o valor da porcentagem de ligante virgem determinada para atender ao critério de  $G^*/\sin\delta$  igual 2,2 kPa. Desses testes à alta temperatura escolhe-se o valor mais rigoroso para os dois critérios. Para valores de baixa temperatura faz-se um gráfico da rigidez (S) e outro para a inclinação (m) versus porcentagem de ligante virgem, novamente adotando-se o critério mais rigoroso para os dois valores. Finalmente um último gráfico é feito para a temperatura intermediária  $G^*\times\sin\delta$  versus porcentagem do ligante virgem. O valor será determinado para atender ao critério de fadiga ( $\leq 5\text{MPa}$ ). Baseado nestes parâmetros requeridos, adota-se um valor (% de ligante virgem) que atenda a todos eles.

Dois métodos utilizando gráficos (*blending charts*) podem ser usados para a determinação do tipo ou quantidade de ligante asfáltico virgem ou agente de reciclagem. O primeiro método é baseado em critérios de desempenho (PG) ( $G^*/\sin\delta$ ,  $G^*\times\sin\delta$ , S, m). Lee et al. (1999) observaram que um aumento na porcentagem de material fresado nas misturas recicladas, causavam um aumento no parâmetro  $G^*\times\sin\delta$  e que esse critério poderia ditar a máxima quantidade deste material a ser adicionado a mistura asfáltica, de forma a não trincá-lo por fadiga. O segundo método é baseado na temperatura em que o critério de desempenho foi satisfeito para uma determinada proporção de ligante asfáltico virgem ou agente de reciclagem. Soleymani et al. (1999) indicam que uma relação linear pode ser usada adequadamente nos dois métodos

(temperatura e critério de desempenho) para mistura de ligantes asfálticos e agentes de reciclagens.

Mcdaniel e Anderson (2001) propuseram métodos de dosagem para misturas asfálticas recicladas a quente, baseados na metodologia SUPERPAVE. Para quantidades de materiais reciclados variando entre 10% e 20% não se faz necessária a extração e recuperação do ligante envelhecido para a determinação das suas propriedades. Para faixas intermediárias entre 20% e 30%, o ligante asfáltico virgem pode ser simplesmente reduzido de um grau no valor do seu PG. Para altas porcentagens de material reciclado (> 30%) será necessário a extração e a recuperação do ligante envelhecido para a determinação das suas propriedades.

Mcdaniel e Anderson (2001) recomendam, para o caso em que mais de 30% de material reciclado seja indicado, a determinação dos parâmetros  $G^*$  e  $\delta$  no DSR a alta temperatura como se o ligante recuperado fosse original, ou seja, não envelhecido. O material remanescente é envelhecido no RTFOT e novamente ensaiado no DSR e ensaiado no BBR para a determinação dos parâmetros S e m a baixas temperaturas.

O passo seguinte é a determinação das propriedades físicas e a determinação das temperaturas críticas. Uma vez conhecidas estas determinações, dois métodos foram propostos para o projeto de mistura SUPERPAVE: método A, onde a porcentagem de material reciclado que fará parte da mistura é conhecida, e método B onde o máximo teor de material reciclado que pode ser utilizado sem mudar o PG do ligante virgem não é conhecido. Ambos os métodos (A e B) assumem que o PG da mistura final será determinado pelo projetista. O processo de dosagem proposto por Mcdaniel e Anderson(2001) é sumarizado a seguir.

O método A é indicado para os casos em que a porcentagem de material asfáltico reciclado que se deseja utilizar na mistura final foi determinado. Uma vez conhecida esta porcentagem, o PG desejado para o ligante final (ligante novo + ligante recuperado) e as propriedades do ligante recuperado (DSR-original  $G^*/\text{sen}\delta$ , DSR-RTFOT  $G^*/\text{sen}\delta$ , DSR-RTFOT+PAV  $G^*\times\text{sen}\delta$ , BBR-S, BBR-m), determina-se a

temperatura crítica (Tc) máxima, mínima e intermediária para o ligante recuperado através das seguintes equações:

$$Tc(alta) = \frac{\log(1,00) - \log(G_1)}{a} + T_1 \quad (2.4)$$

$$Tc(alta) = \frac{\log(2,20) - \log(G_1)}{a} + T_1 \quad (2.5)$$

$$Tc(intermediária) = \frac{\log(5000) - \log(G_1)}{a} + T_1 \quad (2.6)$$

$$Tc(baixa) = \frac{\log(300) - \log(S_1)}{a} + T_1 \quad (2.7)$$

$$Tc(baixa) = \frac{0,300 - m_1}{a} + T_1 \quad (2.8)$$

Onde:

Tc (alta): temperatura crítica alta (baseada no valor do ensaio DSR para o ligante recuperado original);

Tc (intermediária): temperatura crítica intermediária (baseada no valor do ensaio DSR para o ligante recuperado envelhecido após o RTFOT e PAV);

Tc (baixa): temperatura crítica baixa (baseada no valor do ensaio BBR para o ligante recuperado envelhecido após o RTFOT e PAV);

G<sub>1</sub>: valor de G\*/senδ ou G\*×senδ (Tc alta e Tc intermediária, respectivamente) a temperatura específica T<sub>1</sub>;

S<sub>1</sub>: valor de S a uma temperatura específica T<sub>1</sub>;

$m_1$ : valor de  $m$  a uma temperatura específica  $T_1$ ;

$a$ : inclinação da curva rigidez temperatura ( $\Delta \log(G^*/\text{sen}\delta)/\Delta T$ ,  $\Delta \log(G^* \times \text{sen}\delta)/\Delta T$  ou  $\log(S)/\Delta T$ , ( $T_c$  alta,  $T_c$  intermediária e  $T_c$  baixa, respectivamente).

Estimam-se as propriedades do ligante asfáltico virgem usando a equação abaixo para as temperaturas alta, intermediária, e baixa separadamente:

$$T_{\text{virgem}} = \frac{T_{\text{mistura}} - (\% \text{fresado} \times T_{\text{fresado}})}{(1 - \% \text{fresado})} \quad (2.9)$$

Onde:

$T_{\text{virgem}}$ : temperatura crítica do ligante asfáltico virgem;

$T_{\text{mistura}}$ : temperatura crítica final desejada da mistura de ligantes (virgem+recuperado);

$T_{\text{fresado}}$ : temperatura crítica do ligante asfáltico recuperado;

$\% \text{fresado}$ : porcentagem do material reciclado a ser adicionado na mistura (fresado), expresso em decimal.

Constroem-se três gráficos, sendo um para cada temperatura crítica versus a porcentagem de fresado e, verifica-se a mínima temperatura alta e baixa e a temperatura intermediária. Seleciona-se um ligante asfáltico com um PG que atenda a todos os critérios.

O método B segue os mesmos passos do método A até a determinação das propriedades do ligante recuperado, onde a partir desse ponto determina-se a porcentagem de fresado que irá fazer parte da mistura final através da seguinte equação para as temperaturas alta, intermediária e baixa:

$$\% \text{ fresado} = \frac{T_{\text{mistura}} - T_{\text{virgem}}}{T_{\text{fresado}} - T_{\text{virgem}}} \quad (2.10)$$

Onde:

$T_{\text{virgem}}$ : temperatura crítica do ligante asfáltico virgem;

$T_{\text{mistura}}$ : temperatura crítica do ligante asfáltico (recuperado + virgem);

$T_{\text{fresado}}$ : temperatura crítica do ligante recuperado do fresado;

% fresado: porcentagem do material reciclado a ser adicionado à mistura, expresso como decimal.

Finalmente elaboram-se três gráficos, sendo um para cada temperatura crítica (alta, intermediária e baixa) versus a porcentagem de fresado. A porcentagem do fresado deve satisfazer os requisitos para estas três temperaturas.

Após terem sido executadas estas etapas, a dosagem de mistura reciclada segue o mesmo procedimento da dosagem de misturas asfálticas utilizando a metodologia SUPERPAVE, exceto quanto aos seguintes aspectos: o fresado é tratado como um novo agregado, o peso específico do fresado deve ser estimado, o peso do ligante do fresado deverá ser levado em conta quando da pesagem dos agregados, e o teor de asfalto total será reduzido para compensar o ligante asfáltico contido no material fresado (McDaniel e Anderson, 2001).

### **2.7.3 Método de dosagem proposto por Castro Neto (Dersa-SP)**

A metodologia proposta por Castro Neto (2000) em sua dissertação de mestrado propõe que as misturas asfálticas recicladas a quente tenham seu teor de projeto determinado através de ensaios de caracterização mecânica. A filosofia deste trabalho baseou-se em estudos anteriores que mostraram que o módulo de resiliência de uma mistura asfáltica usinada a quente cresce com o aumento da consistência do ligante. Assim, para uma dada granulometria previamente escolhida, determina-se à proporção ideal para a mistura asfalto velho/asfalto novo/agente rejuvenescedor, baseado nos resultados dos ensaios de módulo de resiliência (MR) e resistência à tração (RT).

Os procedimentos de dosagem segundo Castro Neto dispensam a fase do processo relacionado à recuperação do ligante envelhecido, uma vez que a consistência deste ligante não é fator determinante para definição do teor de projeto. Este método considera somente as propriedades mecânicas da mistura reciclada. As etapas deste processo de dosagem são mostradas a seguir.

(1) Inicialmente o projetista determina a quantidade de material fresado que será incorporado à mistura asfáltica, e a faixa de MR ou RT requerida pela mistura asfáltica reciclada.

(2) Estabelecimento da quantidade inicial e do tipo de agente rejuvenescedor. Dependendo da quantidade de material a ser reaproveitado, a quantidade de agente utilizado inicialmente estará variando entre 0 e 1% da mistura total, ou de 0 a 30% do teor total de asfalto existente no material a ser reaproveitado.

(3) Moldagem de corpos de prova Marshall com misturas asfálticas com diversos teores de agente rejuvenescedor. Adota-se inicialmente um teor de agente com 15% da porcentagem de ligante do material fresado, moldam-se corpos de prova e avaliam-se os valores de MR e RT, verifica-se o teor de asfalto mais adequado de acordo com os parâmetros definidos no início do projeto. Moldam-se depois corpos de prova com o teor de agente variando entre 0 e 30% da quantidade de asfalto no fresado. No teor de projeto verifica-se a variação dos parâmetros mecânicos da mistura, determinando o percentual de agente rejuvenescedor em relação à quantidade de asfalto contido no fresado que satisfaz os valores do módulo de resiliência e resistência à tração estimada anteriormente.

## **2.8 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS**

A avaliação de desempenho de misturas asfálticas recicladas pode ser feita por intermédio de ensaios destrutivos, como os teste de compressão diametral, baseados nos comportamentos elásticos e visco-plásticos das misturas, ensaios empíricos que correlacionam os seus resultados com o desempenho no campo (testes de estabilidade

Marshall ou Hveem), e ensaios não destrutivos, baseados nas teorias da mecânica dos materiais (MR, compressão axial), e ainda com testes utilizando o ultrassom (Noureldin e Wood, 1989).

A caracterização mecânica das misturas asfálticas feita através dos ensaios de carga repetida para a determinação do MR, (DNER-ME 133/94) e RT (DNER-ME 138/94), vida de fadiga e deformação permanente, por suas relativas simplicidades na moldagem dos corpos-de-provas e na execução dos ensaios, têm sido bastante utilizadas no Brasil (Motta, 1991; Benevides, 2000).

### 2.8.1 Módulo de Resiliência

Para a determinação do MR de misturas betuminosas (DNER-ME 133/94), determina-se a tensão de tração aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica e a deformação específica recuperável correspondente à tensão aplicada. O MR é definido como a relação entre a tensão de tração e a deformação a uma dada temperatura. O ensaio é realizado em um aparelho de carregamento dinâmico (Figura 2.20), através do ensaio de tração indireta a uma temperatura média de 25°C com corpos-de-prova de aproximadamente 100mm de diâmetro e 63,5mm de altura. Inicialmente procede-se o acondicionamento do corpo-de-prova, aplicando-se 200 repetições de uma carga vertical que produza uma tensão de tração menor ou igual a 30% da resistência a tração da mesma mistura. Aplica-se uma frequência de aplicação de cargas igual a 60 ciclos por segundo (1Hz) e com duração de 0,10 segundo. Registram-se os deslocamentos horizontais máximos após 300, 400 e 500 aplicações para a carga aplicada. O MR do corpo-de-prova ensaiado será a média dos valores para os vários deslocamentos medidos (Medina, 1997), conforme a equação abaixo:

$$Mr = \frac{F(0,9976\mu + 0,2692)}{t\delta r} \quad (2.11)$$

Onde:

Mr: módulo resiliente, MPa;

F: carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova em Newtons;

t: altura do corpo de prova, cm;

$\delta r$ : deslocamento resiliente;

$\mu$ : coeficiente de Poisson (0,25-0,30).

### 2.8.2 Resistência à Tração

O ensaio de tração estática tem por objetivo determinar a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas betuminosas. O corpo de prova destinado ao ensaio pode ser obtido do campo por extração através da sonda rotativa ou fabricado em laboratório, com altura entre 3,50cm a 6,50cm e diâmetro de  $10 \pm 0,2$ cm. O ensaio é feito colocando-se o corpo-de-prova em uma prensa, ajustando-se os pratos desta prensa para dar uma ligeira compressão e para segurar o corpo-de-prova na posição. Aplica-se um deslocamento progressivamente a uma razão de 0,8mm por segundo, até que se dê a ruptura do corpo-de-prova segundo um plano diametral vertical (DNER-ME 138/94) (Figura 2.21). A RT é calculada de acordo com a equação abaixo:

$$RT = \frac{2F}{\pi dh} \quad (2.12)$$

Onde:

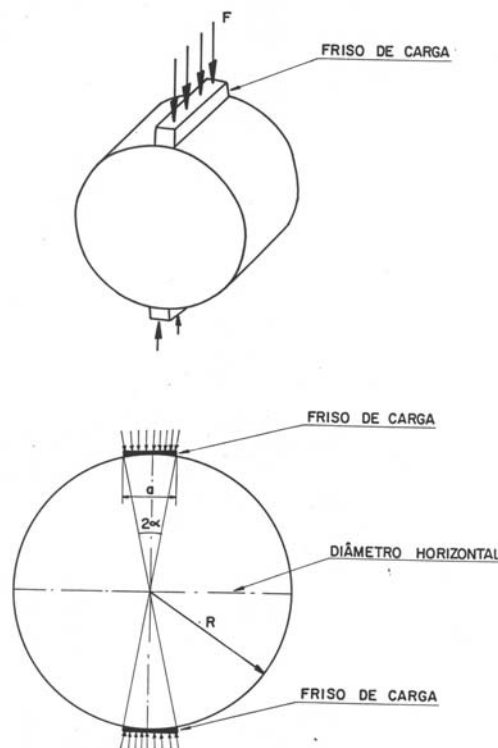
RT: resistência à tração indireta, kgf/cm<sup>2</sup>;

F: carga de ruptura, kgf;

d: diâmetro do corpo-de-prova, cm;

h: altura do corpo-de-prova, cm.

No ensaio de RT a compressão diametral, a força  $F$  aplicada nos corpos de prova se dá através de frisos metálicos com 1,27cm de largura, produzindo tensão de tração ao longo do diâmetro vertical solicitado até que a mesma se iguale a tensão de tração admissível ( $\sigma_t = \sigma_{adm}$ ) provocando o seu rompimento. Falcão e Soares (2002a) verificaram que para diferentes larguras dos frisos a resistência a tração apresentou valores diferentes, e através de observações dos ensaios de RT e simulações numéricas sugeriram uma possível influência das tensões cisalhantes no valor da força máxima ( $F$ ) obtida nestes ensaios, apontando para um crescimento dos valores das tensões cisalhantes com a diminuição da largura do friso (Falcão e Soares, 2002b).



**Figura 2.21:** Esquema do ensaio de tração indireta em amostra cilíndrica (Preussler, 1983)

### 2.8.3 Vida de Fadiga

O fenômeno de fadiga foi descrito por Preussler (1983) como sendo um processo de mudança estrutural permanente, localizada e progressiva que ocorre no material quando este é submetido a condições de carregamento que produzem tensões e deformações repetidas em alguns pontos, resultando trincas ou fratura completa após um número suficiente de repetições com valor máximo menor que a resistência à tração do material.

A vida de fadiga de uma mistura é definida em termos de vida de fratura ou vida de serviço. Para se estimar a vida de fadiga dispõem-se de ensaios estáticos e dinâmicos. A simulação da aplicação de esforços aponta uma preferência por ensaios de flexão, mas por serem mais simples de se executar e moldar os corpos de prova, optou-se pelo ensaio de compressão diametral (Medina, 1997) Figura 2.22. Para determinação da vida de fadiga, os ensaios são realizados utilizando uma frequência de 60 aplicações por minuto (1Hz) com 0,10 segundo de duração do carregamento repetido. O ensaio pode ser realizado sob tensão controlada ou deformação controlada. O ensaio a tensão controlada (TC), a carga aplicada é constante e as deformações resultantes variam com o tempo, sendo aplicado em pavimentos com camada asfáltica de maior rigidez em relação às camadas subjacentes do pavimento que lhes dão suporte e maior espessura (acima de 10cm) (Motta, 1998). O ensaio a deformação controlada (DC), a carga é reduzida do valor inicialmente aplicada, produzindo uma deformação constante. O ensaio para a determinação da vida de fadiga DC é indicado nos casos em que os pavimentos possuem camada de asfalto fraca (baixa rigidez) em relação às camadas que o dão suporte e pequenas espessuras (Motta, 1998). Por questões de facilidade na execução dos ensaios, dá-se preferência à determinação da vida de fadiga a TC.

Com o ensaio de fadiga determina-se o número de repetições necessárias à ruptura completa do corpo-de-prova correspondente geralmente aos níveis de carregamento de 10, 20, 30 e 40% da RT. Desenham-se gráficos das curvas de fadiga relacionando o número de repetições do carregamento (N) e a diferença de tensões chegando-se a relações do tipo (Medina et al., 1990):

$$N = K \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^n \quad (2.13)$$

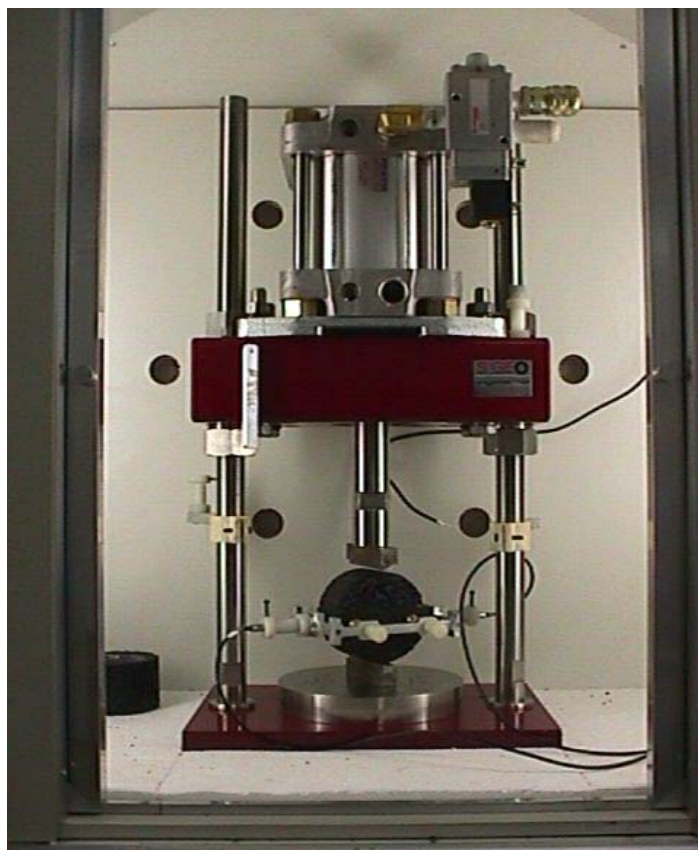
Onde:

N: número de repetições do carregamento a ruptura completa da amostra;

$\Delta\sigma$ : diferença algébrica entre as tensões horizontais (tração) e verticais (compressão);

K e n: constantes obtidas através de regressão linear de N e  $\Delta\sigma$ .

Loureiro et al. (2003) verificando o dano progressivo no ensaio de fadiga a compressão diametral em vários tipos de misturas asfálticas a TC, estabeleceram uma relação entre a deformação crítica de tração e a deformação de tração inicial constante na ordem de cinco vezes em misturas de CBUQ e seis vezes para mistura asfalto-borracha, em todos os níveis de tensão estudados, indicando este parâmetro como um bom indicativo para vida de fadiga em misturas asfálticas, em substituição ao parâmetro números de golpes tradicionalmente usado.



**Figura 2.22:** Equipamento de ensaio de compressão diametral de cargas repetidas

A deformação permanente de uma mistura asfáltica submetida a repetições de cargas é ocasionada pela diminuição de volume de vazios, fluência do material e deformações por cisalhamento (Coelho, 1996). O uso de agregados ásperos e angulosos nas misturas asfálticas melhora o comportamento às deformações permanentes dos pavimentos (Motta, 1991). O ligante influencia a resistência do revestimento asfáltico às deformações permanentes devido as suas características viscosas. Aqui no Brasil têm-se realizados ensaios para medir estas deformações, comumente chamados de ensaios de *creep*, ou compressão uniaxial. O ensaio de *creep* no qual aplica-se uma carga uniaxial constante a um corpo-de-prova cilíndrico, medindo-se a deformação em função do tempo é chamado de *creep* estático. O ensaio de *creep* dinâmico, que a exemplo do estático não é normatizado, tem sido usado para se determinar deformações permanentes em misturas asfálticas. Este ensaio consiste em aplicarem-se cargas pulsantes a um corpo-de-prova, a uma determinada frequência, tempo de aplicação de carga, intervalo entre as aplicações de carga, e temperatura especificada. Os corpos-de-prova são colocados em uma câmara de ensaio com temperatura controlada por um

período superior a duas horas na temperatura especificada. Durante o ensaio os corpos-de-prova são submetidos á aplicação de cargas pulsantes durante uma hora. As medidas das deformações ocorridas nos corpos-de-prova durante os ensaios são feitas através de transdutores (LVDT).

Uma outra forma para se medir deformação permanente em mistura asfáltica é através de simuladores de tráfego, tanto laboratorialmente, como em grande escala. Estes equipamentos permitem uma medição da deformação permanente de uma maneira mais real (Figura 2.23).



**Figura 2.23:** Simulador de tráfego

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo são indicadas as procedências dos materiais que foram utilizados neste trabalho para a dosagem das misturas asfálticas recicladas. Foi apresentada uma descrição dos ensaios de caracterização a que estes materiais foram submetidos e os seus resultados. Os materiais foram agrupados em quatro itens assim divididos: i) material fresado; ii) agregado virgem; iii) ligante asfáltico; iv) agente rejuvenescedor.

#### 3.1 MATERIAL FRESADO

No desenvolvimento desta pesquisa sobre reciclagem de misturas asfálticas a quente foram utilizados materiais retirados de uma avenida, que foi parte integrante de um projeto piloto de fresagem de revestimento asfálticos, desenvolvido sob a responsabilidade da Prefeitura Municipal de Fortaleza. O material fresado utilizado foi proveniente do revestimento da Av. Eng. Santana Júnior (Figura 3.1).



**Figura 3.1:** Fresagem na Av. Eng. Santana Júnior

Este revestimento é do tipo CBUQ, possuindo uma idade média de aproximadamente 10 anos de serviço (informação obtida junto a Secretaria de Infra-

estrutura do Município de Fortaleza - SEINF). Na sua restauração o revestimento foi removido mecanicamente por uma máquina fresadora, do tipo 2000 DC da CIBER, colocado em caminhões basculantes e transportado para um local de propriedade da Prefeitura Municipal, onde o mesmo foi armazenado para posterior utilização (Figura 3.2).



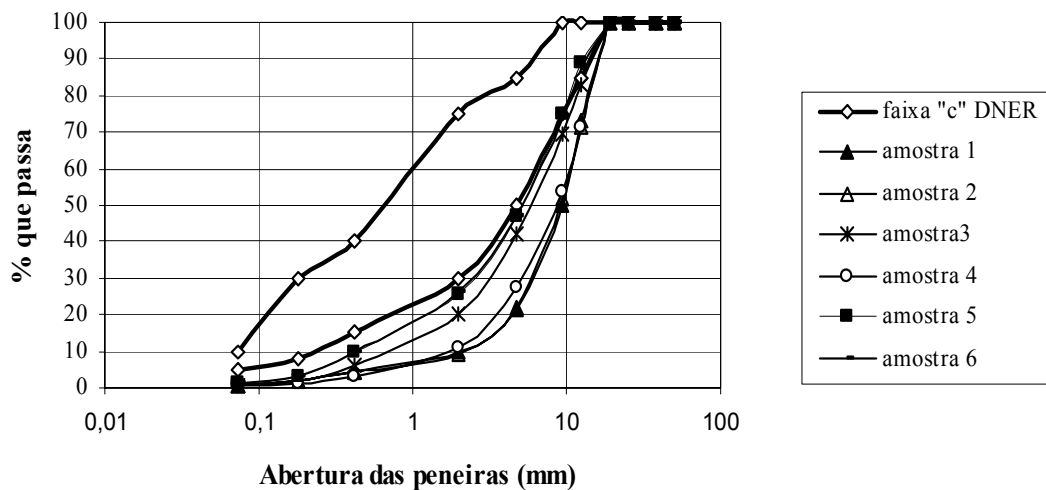
**Figura 3.2:** Estocagem do fresado

Foram coletadas quantidades suficientes de materiais fresados para o desenvolvimento da pesquisa, de forma que, todo o material utilizado tivesse a mesma procedência (fresado da Av. Eng. Santana Júnior). Durante a coleta do material fresado procurou-se escolher locais livres de materiais indesejáveis como plástico, madeira, etc. O processo de amostragem seguiu o mesmo padrão recomendado para a coleta de agregados. O material coletado foi levado para o Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da UFC, onde ficou espalhado por alguns dias e depois devidamente homogêneo, quarteado, e submetido a um peneiramento inicial. Segundo Bonfim (2001), um dos grandes problemas das fresagens a frio é o aparecimento de grumos de asfalto-agregado. Sendo assim procedeu-se um peneiramento inicial fracionando o fresado na peneira de abertura # 3/4. O material retido nesta peneira foi descartado e o passante foi ensacado para posterior utilização.

O material fresado teve sua granulometria determinada com e sem ligante asfáltico, através de peneiramento de acordo com o método DNER-ME 83/98. Foram coletadas 6 amostras do material mencionado acima, com os resultados representados na Tabela 3.1 e a respectiva curva granulométrica mostrada na Figura 3.3.

**Tabela 3.1:** Granulometria do material fresado

Peneiras		% que passa						
pol	mm	amostra 1	amostra 2	amostra 3	amostra 4	amostra 5	amostra 6	Média
1 1/2	38,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1	25,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4	19,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1/2	12,5	73,3	71,4	82,9	71,6	89,3	87,5	79,3
3/8	9,5	50,0	60,0	69,4	53,9	74,8	74,0	62,4
N <sup>o</sup> 4	4,8	21,4	21,7	42,0	27,3	46,7	47,0	34,4
N <sup>o</sup> 10	2,0	9,6	9,4	20,2	10,8	25,4	26,0	16,9
N <sup>o</sup> 40	0,42	4,3	4,3	6,1	3,3	9,6	9,6	6,2
N <sup>o</sup> 80	0,18	1,5	1,6	1,9	1,3	3,2	3,1	2,0
N <sup>o</sup> 200	0,074	0,6	0,6	0,7	0,5	1,4	1,2	0,8

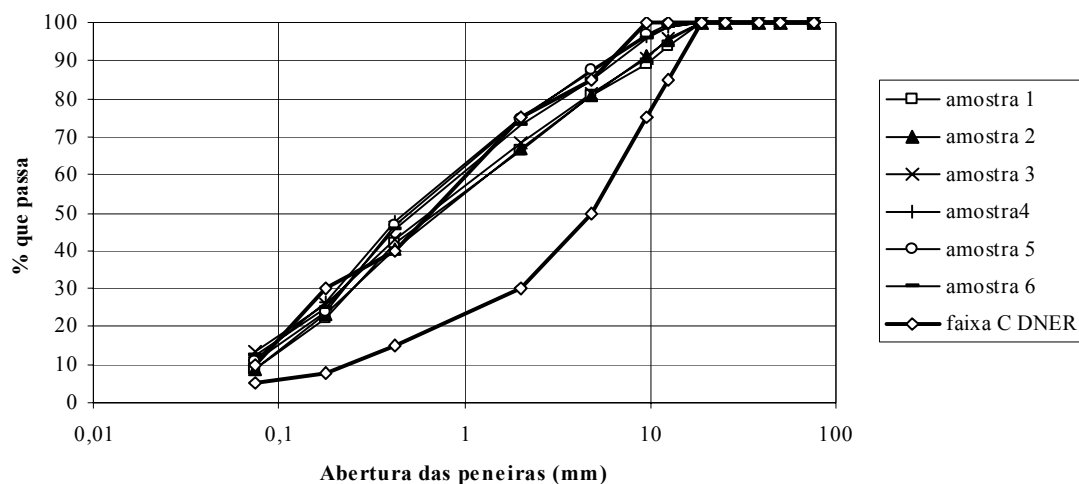


**Figura 3.3:** Distribuição granulométrica das amostras do fresado

Após a realização da extração do ligante asfáltico da mistura fresada, através do equipamento rotarex, determinou-se a graduação e a distribuição granulométrica dos agregados que compõem o fresado, conforme mostrado na Tabela 3.2 e na Figura 3.4. O procedimento adotado foi o mesmo citado anteriormente (DNER-ME 83/98). Foram feitas 6 determinações granulométricas e adotada a média destas determinações.

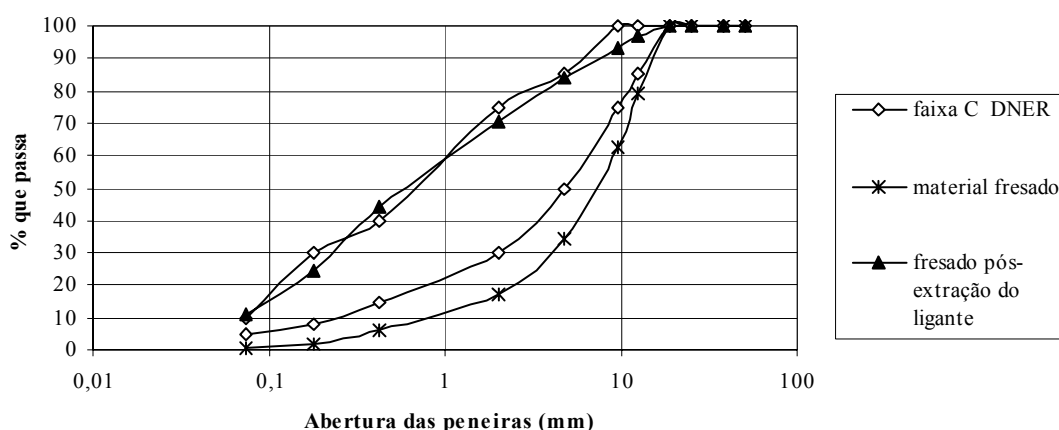
**Tabela 3.2:** Granulometria dos agregados do material fresado pós-extração do ligante

Peneiras		% que passa						
pol	mm	amostra 1	amostra 2	amostra 3	amostra 4	amostra 5	amostra 6	Média
1 1/2	38,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1	25,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4	19,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1/2	12,5	93,6	95,2	95,7	99,0	99,3	98,9	97,0
3/8	9,5	89,2	91,4	90,9	96,3	97,0	95,8	93,4
N <sup>o</sup> 4	4,8	80,8	80,7	81,3	87,3	87,5	85,00	83,8
N <sup>o</sup> 10	2	66,3	66,8	68,2	75,0	74,7	73,0	70,7
N <sup>o</sup> 40	0,42	41,8	40,5	43,1	47,7	46,6	45,8	44,2
N <sup>o</sup> 80	0,18	22,1	23,1	26,1	26,4	24,0	24,8	24,4
N <sup>o</sup> 200	0,074	8,6	8,7	13,3	11,2	10,8	12,4	10,8



**Figura 3.4:** Gráfico de distribuição granulométrica das amostras do fresado pós-extração

Uma comparação entre a distribuição granulométrica média do material fresado e a distribuição granulométrica média de seus agregados pós-extração foi realizada, Figura 3.5.



**Figura 3.5:** Gráfico comparativo das distribuições granulométricas do material fresado e de seus agregados pós-extração do ligante

Após a extração do asfalto determinou-se o teor de ligante do material fresado (T), através da relação de pesos da amostra antes da extração ( $P_a$ ) e pós-extração ( $P_d$ ), conforme equação (3.1):

$$T(\%) = \frac{P_a - P_d}{P_a} \times 100 \quad (3.1)$$

Foram realizadas três determinações do teor de ligante no material fresado, apresentadas na Tabela 3.3. O valor médio obtido foi de 5,9 %. Este teor foi adotado como o teor de ligante representativo da mistura fresada em questão.

**Tabela 3.3:** Teor de ligante do fresado

Amostra	Teor de Ligante %
1	5,8
2	6,0
3	5,9
Média	5,9

A densidade real do material fresado foi determinada pelo método do picnômetro (DNER ME-84/95) para a fração que passou na peneira # 10 e pelo método de pesagem da amostra seca e imersa para as frações graúdas, retidas na peneira # 10 (DNER ME-81/98). Foram feitas três determinações para a fração graúda e três determinações para fração miúda, apresentando um valor médio ponderado com base na

granulometria média igual á 2,408. A densidade aparente do fresado foi determinada para a fração graúda, apresentando um valor médio também para três determinações igual 2,137.

### 3.2 AGREGADOS

Foram utilizados os agregados provenientes de uma pedreira comercial localizada no município de Itaitinga na região metropolitana de Fortaleza (Figura 3.6). A fração graúda do agregado é do tipo granítica enquanto a fração fina proveniente de uma jazida de areia localizada no mesmo local possui características de um areal de campo. Utilizou-se filer artificial de pó cálcareo. Foram realizados os seguintes ensaios para a caracterização destes materiais: granulometria, ensaio de abrasão Los Angeles, densidade e equivalente areia.



**Figura 3.6:** Local de coleta dos agregados (pedreira comercial em Itaitinga)

## Granulometria

Os agregados novos tiveram suas granulometrias determinadas de acordo com o método DNER-ME 83/98 conforme as Tabelas 3.4, 3.5, e 3.6 e as curvas granulométricas conforme as Figuras 3.6 e 3.7, mostradas abaixo:

**Tabela 3.4:** Granulometria da areia de campo

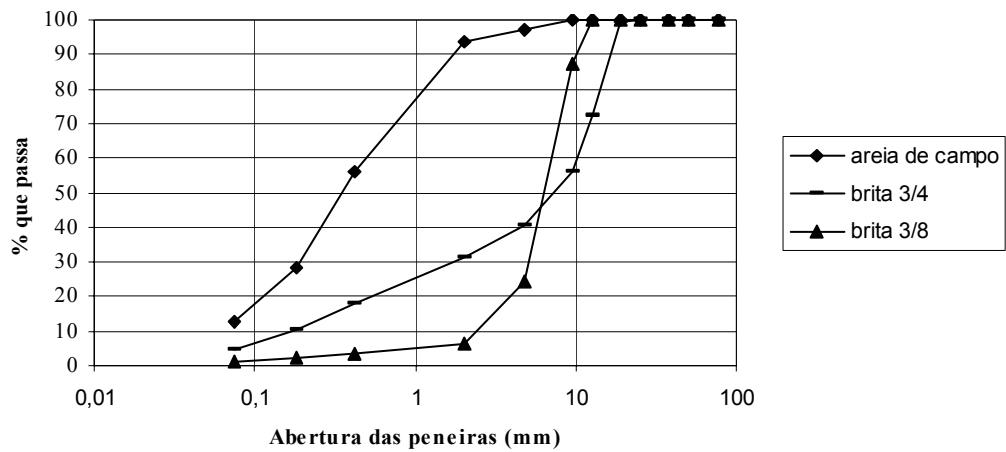
Peneiras		Granulometria passando %			
pol	mm	amostra 1	amostra 2	amostra 3	Média
3	76,2	100,0	100,0	100,0	100,0
2	50,8	100,0	100,0	100,0	100,0
1 1/2	38,1	100,0	100,0	100,0	100,0
1	25,4	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4	19,1	100,0	100,0	100,0	100,0
1/2	12,5	100,0	100,0	100,0	100,0
3/8	9,5	100,0	100,0	100,0	100,0
N <sup>o</sup> 4	4,8	98,3	96,6	96,0	97,0
N <sup>o</sup> 10	2,0	93,7	94,3	93,5	93,9
N <sup>o</sup> 40	0,42	57,2	55,0	55,4	55,8
N <sup>o</sup> 80	0,18	29,3	28,1	28,2	28,5
N <sup>o</sup> 200	0,074	10,7	13,1	14,1	12,6

**Tabela 3.5:** Granulometria da brita 3/8''

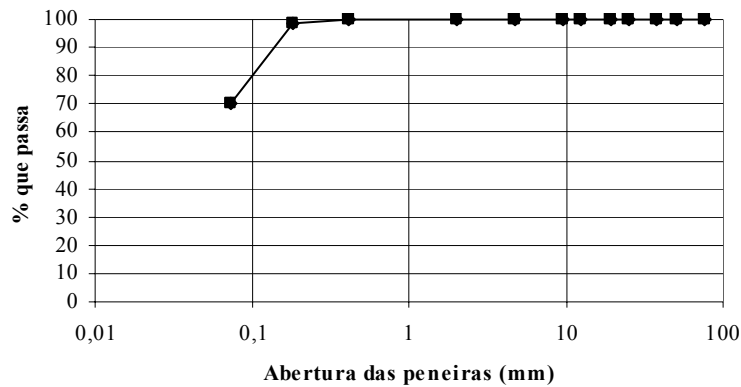
Peneiras		Granulometria passando %			
pol	mm	amostra 1	amostra 2	amostra 3	Média
3	76,2	100,0	100,0	100,0	100,0
2	50,8	100,0	100,0	100,0	100,0
1 1/2	38,1	100,0	100,0	100,0	100,0
1	25,4	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4	19,1	100,0	100,0	100,0	100,0
1/2	12,5	99,7	100,0	100,0	99,9
3/8	9,5	88,3	88,9	85,1	87,5
N <sup>o</sup> 4	4,8	28,2	24,1	20,5	24,2
N <sup>o</sup> 10	2,0	8,4	4,9	5,0	6,1
N <sup>o</sup> 40	0,42	5,2	2,8	3,2	3,7
N <sup>o</sup> 80	0,18	3,2	1,8	2,0	2,4
N <sup>o</sup> 200	0,074	1,6	1,0	1,1	1,2

**Tabela 3.6:** Granulometria da brita 3/4''

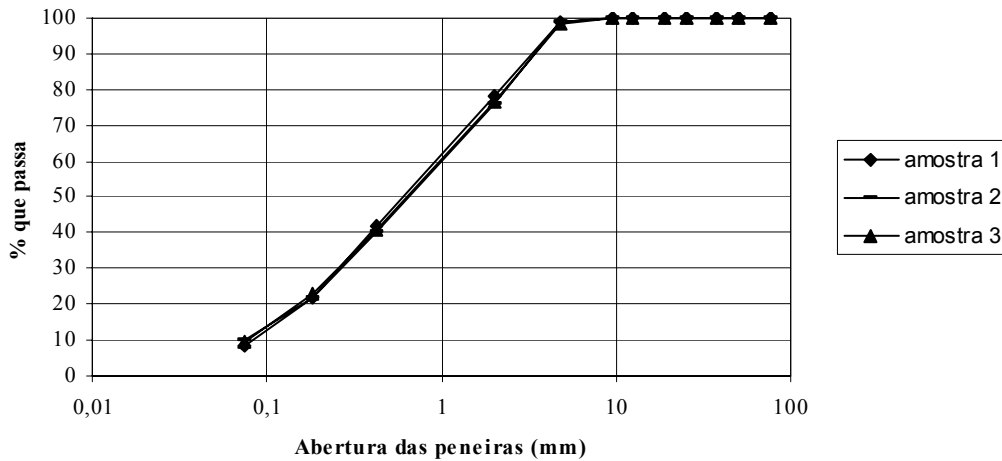
Peneiras		Granulometria passando %			
pol	mm	amostra 1	amostra 2	amostra 3	Média
3	76,2	100,0	100,0	100,0	100,0
2	50,8	100,0	100,0	100,0	100,0
1 1/2	38,1	100,0	100,0	100,0	100,0
1	25,4	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4	19,1	99,4	100,0	99,3	99,6
1/2	12,5	75,9	72,2	68,5	72,2
3/8	9,5	60,3	57,8	49,8	55,9
N <sup>o</sup> 4	4,8	45,0	42,9	33,9	40,6
N <sup>o</sup> 10	2,0	34,7	33,4	25,2	31,1
N <sup>o</sup> 40	0,42	20,5	19,3	14,6	18,1
N <sup>o</sup> 80	0,18	11,8	10,7	7,9	10,2
N <sup>o</sup> 200	0,074	5,5	4,7	3,4	4,5



**Figura 3.7:** Distribuição granulométrica dos agregados novos



**Figura 3.8:** Distribuição granulométrica do filler (pó calcáreo)



**Figura 3.9:** Distribuição granulométrica do pó-de-pedra

### *Desgaste por Abrasão Los Angeles*

O ensaio de abrasão foi realizado segundo o método do DNER (DNER-DPT M 35-64). Este foi realizado para a brita 3/4 e para o material fresado separadamente. Pesou-se, aproximadamente, 5000g de brita 3/4, 2500g passando na peneira de 9,5 mm e retido na de 6,3 mm, e em seguida, 2500 g passando na de 6,3 mm e retido na de 4,8 mm, totalizando as 5000 g. O mesmo procedimento foi realizado para o material fresado. Segundo a norma, para a faixa C do DNER (faixa onde se encontram as 2 misturas estudadas), são necessárias para a realização do ensaio 8 esferas, de massa total  $3330 \pm 20g$  (Figura 3.10), a fim de obter a massa necessária.



**Figura 3.10:** Esferas para ensaio de abrasão Los Angeles

Colocou-se o material a ser ensaiado, juntamente com a carga abrasiva, no tambor da máquina Los Angeles (Figura 3.11) e iniciaram-se as 500 revoluções. Após o ensaio, o material foi retirado do tambor e passado através da peneira de 1,7 mm. Para maior precisão no ensaio, o material retido foi lavado nessa mesma peneira em água corrente, secado em estufa e só então foi anotado o peso dos grãos retidos na peneira. Os resultados encontrados para a brita 3/4 e material fresado foram, respectivamente, 48,9 e 40,2%.



**Figura 3.11:** Equipamento Los Angeles

Segundo a nova especificação para o ensaio de abrasão Los Angeles do DNER (DNER ES 313/97) o limite de aceitação do ensaio é de 40%, em contraste com os 50% anteriormente adotados (DNER ES P 22/71). Ficando assim, tanto a brita 3/4, quanto o material fresado, fora do limite aceitável. O material fresado apresentou desgaste menor que a brita, possivelmente devido à presença do ligante. Este, por sua vez, faz com que desagregação das partículas menores seja minimizada, influenciando diretamente no resultado do ensaio.

#### *Ensaio de Equivalente Areia*

O ensaio de equivalente areia mede a relação entre a altura de areia depositada em um frasco contendo uma solução aquosa de cloreto de cálcio depositada após 20 minutos de sedimentação, e a altura total de areia depositada mais os finos (silte + argila) em suspensão após aquele mesmo tempo de sedimentação (DNER ME 054/94).

O equivalente areia do material fino (passante na peneira 10) proveniente do areal da pedreira de Itaitinga, apresentou um valor médio para três determinações igual a 48,1%, abaixo do valor recomendado pelas especificações do DNER utilizado nas misturas asfálticas, que é de 55%. Foram feitas três determinações do material passante na peneira nº 10 da mistura granulométrica (areia + agregado) obtendo-se um resultado igual a 64%, valor acima do mínimo especificado pela norma citada.

#### *Ensaio de Densidades*

As densidades reais e aparentes dos agregados miúdos e graúdos utilizados nesta pesquisa foram determinadas de acordo com as normas DNER-ME.81/98, DNER-ME 84/95 DNER-ME85/94, DNER-ME93/940. Os seus valores médios são mostrados na tabela abaixo.

**Tabela 3.7:** Densidades dos agregados

Agregados	Areia de Campo	Pó-de-pedra	Brita 3/8	Brita 3/4
Densidade Real	2,625	2,643	2,654	2,652
Densidade Aparente	-	-	2,590	2,626

### 3.3 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO

Uma primeira etapa de caracterização do CAP foi parcialmente realizada antes mesmo do início deste trabalho de pesquisa (Soares et al., 1999). Foram analisados os CAPs de penetração 30/45, 50/60 e 85/100 produzidos a partir do petróleo Bachaquero na PETROBRAS/LUBNOR (Figura 3.12).



**Figura 3.12:** Amostra coletada do CAP da PETROBRÁS/LUBNOR

A segunda etapa de caracterização foi realizada nos materiais asfálticos utilizados neste estudo de reciclagem a quente, sendo estes o CAP envelhecido extraído do revestimento fresado e o novo ligante virgem que será incorporado à mistura reciclada.

A composição química dos três CAP analisados na primeira etapa está apresentada na Tabela 3.8 e não varia muito com a consistência do CAP. A aromaticidade é praticamente a mesma para os três tipos e se observa um aumento do teor de asfaltenos com o aumento da consistência.

**Tabela 3.8:** Resultados de análise de amostras de CAP Bachaquero da LUBNOR

Ensaíos	CAP 30/45	CAP 50/60	CAP 85/100
Fracionamento SARA (%) <sup>1</sup>			
Saturados	6	7	8,1
Aromáticos	20	28	26
Resinas	47	45	47
Asfaltenos	27	20	18
Carbono aromático (%) <sup>2</sup>	33,3	33,1	32,9

Observações:

(1): Determinado pelo método IATROSCAN TLC/FID-Cromatografia em camada fina com detecção por ionização de chama.

(2): Determinado pelo método RMN-Ressonância nuclear magnética.

A Tabela 3.9 apresenta os resultados das análises relativas às especificações SUPERPAVE dos três tipos de CAP. A viscosidade Brookfield foi realizada com *spindle* 21 empregando três diferentes taxas de cisalhamento (rotações), obtendo a mesma viscosidade, indicando que os três ligantes são newtonianos. A viscosidade mais alta a 135°C do CAP 30/45 indica que o mesmo irá requerer temperaturas mais altas de usinagem e compactação que o CAP 50/60.

A classificação do CAP 85/100 como PG 52-28 mostra que o mesmo não é apropriado para ser usado em CBUQ em Fortaleza, pois sua resistência à formação de trilhas de roda está limitada à temperatura máxima de pavimento de 52°C sem considerar o tráfego. Nas medições de temperatura realizadas em uma pista experimental em Fortaleza, utilizando revestimento do tipo CBUQ com a indicação do CAP 30/45, já se determinaram temperaturas de pavimento superiores a 52°C. Embora a classificação do CAP 30/45 (PG 70-16) seja diferente do CAP 50/60 (PG 64-16), os resultados obtidos revelam que os mesmos são bastante semelhantes quanto às temperaturas de resistência à fadiga e à formação de trincas térmicas.

**Tabela 3.9:** Resultados de análises relativas às especificações SUPERPAVE de amostras de CAP Bachaquero da LUBNOR

Ensaio	CAP 30/45	CAP 50/60	CAP 85/100
Viscosidade @ 135°C, cP			
15 RPM/SP 21	554	466	210
30 RPM/SP 21	545	466	210
60 RPM/SP 21	544	469	211
G*/ sen $\delta$ (1 kPa mín), °C	70 (1,1)	70(1,1)	58 (1,1)
Após RTFOT			
Perda em massa, % RTFOT	0,41	0,23	0,27
G*/ sen $\delta$ (2,2 kPa mín), °C	70 (2,4)	64(4,1)	52 (4,4)
Após RTFOT / PAV			
G* sen $\delta$ (5 MPa máx), °C BBR	25 (4,1)	25(4,9)	19 (3,8)
Temperatura, °C	-6	-6	-18
S=300 MPa máx	117	186	296
m=0,3 mín	0,38	0,38	0,36
Grau de Desempenho	70-16	64-16	52-28

Na segunda etapa da caracterização dos CAPs determinaram-se os valores de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade dinâmica a 60°C (características convencionais), além da determinação dos parâmetros reológicos (G\* e  $\delta$ ) considerados na metodologia SUPERPAVE. Constata-se através destes parâmetros convencionais que o ligante extraído da mistura fresada em questão sofreu processo de envelhecimento apresentando baixos valores de penetração, elevada viscosidade e ponto de amolecimento acima de 60°C (Tabela 3.10). Tais resultados estão fora dos limites característicos dos ligantes usualmente aplicados na pavimentação das rodovias cearenses (CAP 50/60).

**Tabela 3.10:** Características convencionais do ligante extraído do fresado

Características	Resultados
Penetração a 25°C	23 dmm
Ponto de amolecimento	61,0 °C
Viscosidade dinâmica (60°C)	17354 P

Na Tabela 3.11 apresentam-se os parâmetros reológicos avaliados de acordo com as especificações SUPERPAVE para o ligante extraído da mistura fresada. Verificou-se na classificação deste ligante asfáltico trata-se de um PG 76-22, um grau

acima da classificação normalmente apresentada pelos CAP's virgens utilizados no estado do Ceará (Soares et al., 1998).

**Tabela 3.11:** Parâmetros SUPERPAVE do ligante extraído do fresado

Cisalhamento dinâmico – Fadiga/ASTM P246							
Temperatura (°C)	40	37	34	31	28	25	22
G* (kPa)	328	550	920	1530	2554	4225	6919
$\delta$ (°)	69,5	67,3	65,0	62,5	59,7	56,6	53,3
G*/sen $\delta$ (MPa)	0,3	0,5	0,8	1,4	2,2	3,5	5,6
Cisalhamento dinâmico – Deformação Permanente/ASTM P246							
Temperatura (°C)	64	70	76	-	-	-	-
G*(kPa)	7432	3301	1527	-	-	-	-
$\delta$ (°)	81,9	84,0	85,8	-	-	-	-
G*/sen $\delta$ (kPa)	7,5	3,3	1,5	-	-	-	-

A caracterização do ligante virgem novo usado nesta pesquisa indica tratar-se de um CAP 50/60, classificado como PG 64-16 conforme a metodologia SUPERPAVE. Note que nesta amostra ensaiada houve uma diferença no chamado “grau a temperatura intermediária”, que aqui aparece como 22°C, ao invés de 25°C mostrado na Tabela 3.9, indicando que o ligante tem a rigidez suficiente para um bom desempenho a fadiga na temperatura intermediária de 22°C. Os valores das características convencionais e dos parâmetros reológicos considerados pela metodologia SUPERPAVE, encontram-se nas Tabelas 3.12 e 3.13.

**Tabela 3.12:** Características convencionais do CAP 50/60

Características	Resultados
Penetração a 25°C	53 dmm
Ponto de amolecimento	50,5 °C
Viscosidade dinâmica (60°C)	3411 P

**Tabela 3.13:** Parâmetros SUPERPAVE do CAP 50/60

Cisalhamento dinâmico – Fadiga/ASTM P246				
Temperatura (°C)	28	25	22	19
G* (kPa)	1430	2463	4200	7082
$\delta$ (°)	63,17	60,00	56,48	52,64
G*/sen $\delta$ (MPa)	1,2	2,1	3,5	5,6
Cisalhamento dinâmico – Deformação Permanente (após RTFOT) /ASTM P246				
Temperatura (°C)	58	64	70	-
G*(kPa)	7200	3143	1433	-
$\delta$ (°)	83,27	85,11	86,55	-
G*/sen $\delta$ (kPa)	7,2	3,1	1,4	-

### 3.4 AGENTES REJUVENECEDORES-AR

Foram caracterizados três tipos de ARs produzidos pela LUBNOR em Fortaleza (Figura 3.13). As características destes três agentes desenvolvidos encontram-se descritas na Tabelas 3.14.



**Figura 3.13:** Amostra produzida na LUBNOR dos ARs 75, 250, 500

**Tabela 3.14:** Características dos três Agentes Rejuvenescedores

Agente Rejuvenescedor: AR – 75			
Características	Método	Unidades	Resultados
Viscosidade Cinemática à 60°C	ASTM D 2170	cSt	8260
Ponto de Fulgor	ASTM D 92	°C	250
ECA – Variação de Massa	ASTM D 1754	%	0,7
ECA – Relação de Viscosidade	ASTM D 1754	-	1,8
Agente Rejuvenescedor: AR – 250			
Características	Método	Unidades	Resultados
Viscosidade Cinemática à 60°C	ASTM D 2170	cSt	22822
Ponto de Fulgor	ASTM D 92	°C	258
ECA – Variação de Massa	ASTM D 1754	%	0,7
ECA – Relação de Viscosidade	ASTM D 1754	-	1,8
Agente Rejuvenescedor: AR – 500			
Características	Método	Unidades	Resultados
Viscosidade Cinemática à 60°C	ASTM D 2170	cSt	57000
Ponto de Fulgor	ASTM D 92	°C	274
ECA – Variação de Massa	ASTM D 1754	%	0,5
ECA – Relação de Viscosidade	ASTM D 1754	-	1,8

Observou-se através da viscosidade destes materiais que o AR-75 e o AR-250 têm baixa viscosidade a 60°C. O AR-500 apresenta o maior valor de viscosidade entre os três ARs analisados, sendo seu valor equivalente ao encontrado para o CAP 7, cimento asfáltico muito utilizado na década de 60 e 70, tendo sido substituído por ligantes mais consistentes (CAP 20 e CAP 40).

Segundo Alvim (1999) o AR-75 é utilizado quando o ligante recuperado está muito envelhecido, e o teor de agregados novos é menor que 30%. Optou-se nesta pesquisa pelo uso do AR-75 para todas as misturas, mesmo para aquelas em que o teor de agregados novos ultrapassou 30%. A adição deste novo material asfáltico teve o objetivo de recuperar as propriedades elásticas do ligante extraído do fresado que foram modificadas com o envelhecimento do mesmo. Tal recuperação é fundamental, principalmente quando uma das principais preocupações no projeto de misturas é a falência de pavimentos provocada pela fadiga devido ao dano contínuo por carregamento repetido.

### **3.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS RECICLADAS**

Para a caracterização das misturas recicladas foram estabelecidos quatro tipos de misturas, com teores de material fresado de 0%, 10%, 30% e 50%, respectivamente. A mistura sem material fresado foi dosada conforme as especificações para dosagem Marshall (DNER-), as demais misturas seguiram os procedimentos do *Asphalt Institute* (MS-20, 1986), que qual estabelece critérios para as determinações dos teores de asfalto novo e do AR, ambos já mencionados no capítulo anterior.

Uma vez determinados os teores de projeto, moldaram-se 15 corpos de prova para cada tipo de mistura, compactados no compactador Marshall, onde foram aplicados 50 golpes em cada lado determinando-se suas densidades, aparente e máxima teórica para o cálculo dos parâmetros volumétricos das misturas compactadas (Vv, RBV e VAM). Estes parâmetros são mostrados no capítulo referente aos resultados.

Os seguintes ensaios foram realizados para a caracterização das misturas asfálticas: resistência à tração, módulo de resiliência e vida de fadiga.

#### *Resistência à tração*

Para a determinação da resistência à tração das misturas asfálticas analisadas, procedeu-se conforme a metodologia (DNER-ME 138/94), sendo determinadas as resistências a tração para três corpos de prova, previamente confinados em uma câmara por um período não inferior a quatro horas, estabilizando a temperatura em 25°C.

Na execução do ensaio colocou-se o corpo de prova na bandeja inferior da prensa, centralizando o mesmo, sendo a carga transferida ao corpo de prova por intermédio de dois frisos metálicos curvos com 1,27cm de corda colocados em diâmetros opostos. Aplica-se uma ligeira compressão para segurar firmemente o corpo de prova fixo na posição. Aplica-se um deslocamento a uma velocidade de 0,8mm/s, até que se dê a ruptura do corpo de prova, segundo um plano diametral vertical. Anota-se a

leitura do medidor, que multiplicado pela constante do aparelho, dará o valor da carga aplicada, que entrará no cálculo da RT de acordo com a equação 2.12. Fizeram-se três determinações de RT para cada mistura estudada, sendo considerado o valor médio para cada uma delas. Calculou-se o desvio padrão para estas três determinações.

### *Módulo de resiliência*

O módulo de resiliência foi determinado de acordo com o método de ensaio (DNER-ME 133/94). Para cada teor de material fresado separaram-se três corpos de prova moldados no teor de projeto, que foram colocados previamente na câmara onde se realiza o ensaio por um período mínimo de quatro horas a temperatura de 25°C.

Com os corpos de prova na temperatura especificada, posicionou-se a amostra a ser ensaiada na base da prensa, apoiado no friso metálico inferior, posiciona-se e ajusta-se o LVDT no corpo de prova de modo a obter os registros dos deslocamentos horizontais nos corpos de prova. Assenta-se o pistão de carga com o friso metálico superior em contato com o corpo de prova diametralmente oposto ao friso metálico inferior. O sistema da prensa dotado de um sistema pneumático que garanta uma aplicação de carga pulsante é controlado por um computador acoplado ao mesmo.

Aplica-se um carregamento pulsante com a duração de 0,1s e 0,9s de repouso, simulando o efeito do carregamento dinâmico provocado pela passagem do tráfego. Procedeu-se um pré-condicionamento do corpo de prova aplicando-se 200 repetições de uma carga vertical (F) que produza uma tensão à tração igual a 15% da resistência à tração da mistura, definida previamente. Registram-se os deslocamentos máximos após 300, 400 e 500 repetições da carga F, tomando-se como valor do módulo de resiliência o valor médio calculado para os deslocamentos medidos dos três carregamentos.

Repetiu-se o mesmo procedimento para os três corpos de prova. O resultado do ensaio de MR para cada mistura ensaiada é a média aritmética dos valores obtidos para os três corpos de prova. Calculou-se o desvio padrão para as três determinações de MR.

### *Vida de fadiga*

Para o cálculo da vida de fadiga de cada mistura analisada utilizou-se procedimento idêntico ao ensaio de MR, em relação à montagem dos corpos de provas no equipamento. Aplicou-se a mesma frequência de carregamento utilizada nos ensaios de MR, determinando o número de golpes necessários para romper os corpos de provas segundo os seus planos diametrais para três níveis de tensão analisados (20%, 30% e 50% da RT, determinada previamente para cada tipo de mistura). Para cada nível de tensão utilizado foram feitas três determinações dos números de golpes necessários para determinação da vida de fadiga, sendo portanto ensaiados nove corpos de provas por cada mistura analisada.

Com os resultados obtidos nos ensaios de fadiga, desenharam-se gráficos log-log com auxílio da planilha eletrônica MS-Excel, relacionando os números de golpes necessários para levar os corpos de provas ao rompimento, versus as diferenças de tensões verticais de compressão e horizontais de tração, ambas relacionadas ao centro destes corpos de provas ( $\Delta\sigma$ ). Traçaram-se para cada mistura linhas de tendência entre os números de repetições de carga determinados para cada um dos três níveis de tensão das misturas.

Foi medido também nos ensaios de vida de fadiga o deslocamento horizontal relativo aos números de golpes que romperam os corpos de provas. Com esses deslocamentos é possível medir as deformações críticas de tração, determinando a vida de fadiga por um outro método que não seja necessário à ruptura completa destes corpos de prova.

## CAPÍTULO 4

### APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para os ensaios de caracterização mecânica das misturas asfáltica recicladas, utilizaram-se três misturas de CBUQ com diferentes teores de fresado (10%, 30%, 50%) e uma mistura asfáltica sem a presença de material fresado, assim definidas:

- Mistura I (0 % de fresado);
- Mistura II (10% de fresado);
- Mistura III (30% de fresado);
- Mistura IV (50% de fresado).

Os agregados utilizados neste trabalho foram brita 3/8, areia de campo e filer artificial de pó calcáreo. Estes materiais foram fracionados conforme a Tabela 4.1, sendo dessa forma possível montar as granulometrias desejadas para as pesquisas de dosagem. Os ensaios de caracterização dos agregados utilizados nas misturas betuminosas foram descritos no capítulo anterior.

**Tabela 4.1:** Fracionamento realizado nos agregados virgens

Intervalo de peneiras	Material
1" - 3/4"	Brita 3/8"
3/4" - 1/2"	Brita 3/8"
1/2" - 3/8"	Brita 3/8"
3/8" - N <sup>o</sup> 4	Brita 3/8"
N <sup>o</sup> 4 - N <sup>o</sup> 10	Areia de campo
N <sup>o</sup> 10 - N <sup>o</sup> 40	Areia de campo
N <sup>o</sup> 40 - N <sup>o</sup> 80	Areia de campo
N <sup>o</sup> 80 - N <sup>o</sup> 200	Areia de campo
Passando na N <sup>o</sup> 200	Pó calcáreo

As misturas dos agregados com ligante (CAP + AR) e material reciclado, e a mistura convencional foram dosadas de acordo com a metodologia do *Asphalt Institute*

(MS-2 e MS-20), utilizando o procedimento Marshall. De acordo com este método existem duas maneiras de se escolher o teor de projeto:

1. A primeira baseada somente no volume de vazios (Vv). O teor ótimo é escolhido aquele referido as médias das especificações ou ao valor igual a 4%;
2. A segunda baseada na estabilidade Marshall, peso específico e volume de vazios (Vv). O teor ótimo escolhido é uma média dos três teores, correspondente aos teores de máxima estabilidade, máximo peso específico da amostra compactada e a um volume de vazios igual a 4% ou a média das especificações;

Um terceiro método, também utilizado, baseia-se num valor escolhido a partir dos teores obtidos para atender aos limites de volume de vazios (3% a 5%) e Relação Betume-Vazios (RBV) (75% a 82%).

Em todos os três casos os valores dos parâmetros de estabilidade Marshall, fluência e vazios no agregado mineral (VAM) são enquadrados nas especificações. Neste trabalho optou-se pelo terceiro procedimento, que é o adotado pela 3ª Unidade de Infra-Estrutura Terrestre do Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNER), no Ceará (Soares et al., 1999).

Nas misturas onde se utilizaram os reciclados, o material fresado foi misturado com o agregado virgem para a obtenção da granulometria requerida de acordo com as especificações da faixa C do DNER (Tabela 4.2).

**Tabela 4.2:** Granulometria da faixa C (DNER)

Peneiras		Composição dos agregados				
Pol	mm	Faixa de Controle			Faixa C	
		Pmin	Pmed	Pmáx	Xmin	Xmáx
3/4	19	100	100	100	100	100
1/2	12,5	86	93	100	85	100
3/8	9,5	78	85	92	75	100
n <sup>o</sup> 4	4,8	60	65	70	50	85
n <sup>o</sup> 10	2,0	45	50	55	30	75
n <sup>o</sup> 40	0,42	25	30	35	15	40
n <sup>o</sup> 80	0,18	12	15	18	8	30
n <sup>o</sup> 200	0,075	5	7	10	5	10

Após a determinação da granulometria para a mistura dos agregados e dos agregados + fresado, calculou-se a demanda total de asfalto e a quantidade de asfalto novo necessária à mistura, de acordo com as equações 3.1 e 3.2. A porcentagem de agente rejuvenescedor foi determinada através do gráfico log-log de viscosidade versus porcentagem de asfalto novo (*blending chart*, Figura 2.16). A consistência do asfalto novo e do AR bem como as suas proporções, foram selecionadas de forma que o asfalto envelhecido tivesse as suas propriedades recuperadas e a mistura asfáltica resultante fosse enquadrada dentro dos critérios funcionais das especificações para o teor ótimo de projeto. Os teores de asfalto novo e de AR foram definidos para uma viscosidade do asfalto recuperado do material fresado igual a 17354 P, viscosidade do CAP novo de 3411P, viscosidade do AR-75 igual 83P e viscosidade pretendida para a mistura (CAP recuperado + CAP virgem + AR) de 3000P.

Determinada a quantidade de asfalto e AR necessários para a mistura, foram estabelecidas cinco tentativas de misturas com incrementos de  $\pm 0,5\%$  e  $\pm 1,0\%$ , a partir do teor relativo de demanda total de asfalto. Moldaram-se para cada mistura 3 corpos de prova, totalizando 15 corpos de prova para cada teor de fresado (0%, 10%, 30% e 50%) (Figura 4.1).



**Figura 4.1:** Corpos de prova moldados para a definição do teor de projeto

Os teores de projetos das misturas betuminosas recicladas foram determinados a exemplo do procedimento utilizado para as misturas convencionais explicado anteriormente e objeto do método de ensaio DNER (ME 043/64). A densidade aparente da mistura compactada foi determinada de acordo com o método de ensaio DNER-ME 117/87. Para o cálculo do volume de vazios foi determinada a densidade máxima teórica (DMT) através da fórmula matemática que leva em consideração as densidades efetivas dos agregados que compõe a mistura, e através de determinação pelo ensaio a vácuo (ASTM D 2041). Para a determinação da DMT em laboratório, utilizou-se o equipamento mostrado na Figura 4.2, sendo feita três determinações para cada teor de asfalto estudado (Figura 4.3).



**Figura 4.2:** Equipamento para a determinação da DMT



**Figura 4.3:** Mistura preparada para a determinação da DMT

Diferentes métodos para a determinação da DMT levam a diferentes parâmetros volumétricos para a mistura asfáltica (Vasconcelos et al., 2003), embora a precisão dos resultados desse ensaio seja melhor para valores próximos ao teor de projeto da mistura (Asphalt Institute, 1995). A Tabela 4.3 mostra os resultados dessas variações e a Tabela 4.4 as variações dos parâmetros volumétricos para os teores de projetos das misturas calculados pelos dois métodos.

**Tabela 4.3:** Densidades máximas teóricas

Mistura	Fórmula	ASTM D 2041
I	2,412	2,399
II	2,441	2,430
III	2,392	2,371
IV	2,351	2,342

**Tabela 4.4:** Teor de projeto e parâmetros volumétricos das misturas

Mistura	Fórmula		ASTM D 2041	
	Vv(%)	RBV(%)	Vv(%)	RBV(%)
I	4,3	76	3,8	78
II	4,0	77	3,5	76
III	4,4	72	3,6	76
IV	3,7	76	3,3	78

Para a determinação dos teores de projeto, utilizou-se nos cálculos dos parâmetros Marshall a DMT calculada de acordo com a fórmula das densidades efetivas ponderadas, em virtude da não disponibilidade do equipamento apropriado para o ensaio de determinação da DMT no início desta pesquisa. Por questão de manter a coerência entre os resultados prosseguiu-se até o final utilizando nos cálculos dos parâmetros de dosagem, o valor da DMT calculada. As características das quatro misturas asfálticas são mostradas na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5:** Parâmetros de dosagem das misturas recicladas

Parâmetros	Misturas			
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Densidade do CAP	1,02	1,02	1,02	1,02
Densidade aparente da mistura	2,308	2,344	2,286	2,264
Teor de projeto(%)	6,0	5,8	5,1	5,2
% total de ligante novo	6,0	5,2	3,4	2,2
% de CAP	6,0	4,7	2,6	1,0
% de AR	0,0	0,5	0,8	1,2
Volume de vazios (%)	4,3	4,0	4,4	3,7
Relação Betume-Vazio (%)	76	77	72	76
Vazios no Agregado Mineral (%)	18	17	16	16

Para a avaliação do comportamento mecânico das misturas asfálticas recicladas foram realizados ensaios de resistência à tração (RT) (DNER 138/94), módulo de resiliência (MR) (DNER 133/94), fadiga à compressão diametral a tensão controlada para todos os quatros tipos de misturas, no teor de projeto.

Os ensaios de RT foram realizados a uma temperatura de 25°C, aplicando-se uma carga variando a uma velocidade de 0,8mm/s , até a ruptura do corpo de prova, segundo o plano diametral vertical. Calcula-se a resistência à tração em kgf/cm<sup>2</sup> pela equação 2.12. mostrada no Capítulo 2. Foram moldados três corpos de prova para cada um dos quatro tipos de mistura analisada. A Tabela 4.6 apresenta o valor médio das determinações das RT's desses corpos-de-prova e a Figura 4.4 um corpo de prova ensaiado nesta pesquisa.

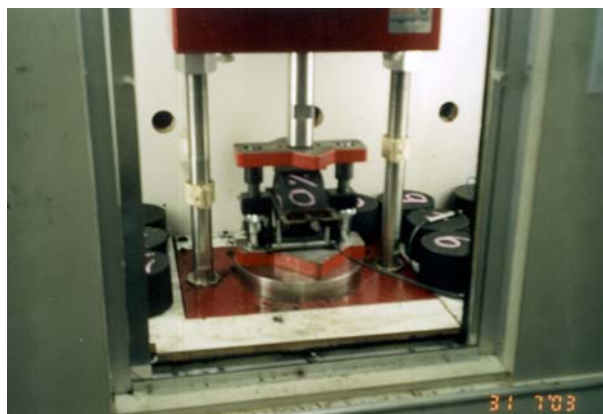
**Tabela 4.6:** Resultados dos ensaios de RT

Tipo de mistura	RT(MPa)	Desv. Pad.(MPa)
I	1,2	0,02
II	1,3	0,13
III	1,3	0,14
IV	1,6	0,09



**Figura 4.4:** Detalhe de uma amostra rompida no ensaio de RT

Os ensaios para a determinação do MR foram realizados com a moldagem de três corpos de prova por tipo de mistura, utilizando o ensaio de compressão diametral com cargas repetidas a uma temperatura de 25°C. A moldagem desses corpos de prova e a execução dos ensaios foram feitos de acordo com a metodologia de ensaio do DNER-ME 133/94 (Figura 4.5).



**Figura 4.5:** Ensaio de MR

Na Tabela 4.7 são apresentados os resultados médios do ensaio de MR, e na Tabela 4.8 a relação entre os parâmetros mecânicos MR e RT.

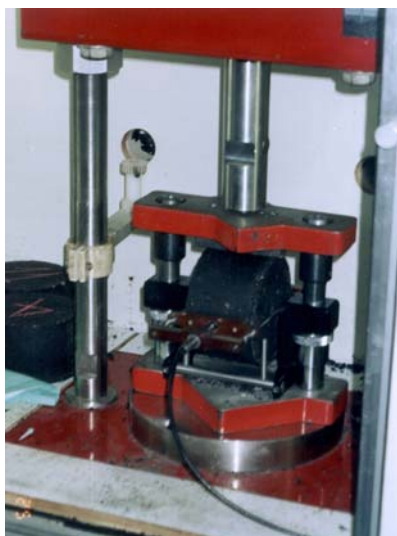
**Tabela 4.7:** Resultado dos ensaios de MR

Tipos de misturas	MR (MPa)	Desv.Pad.(MPa)
I	3200	248
II	4776	146
III	7524	320
IV	8901	844

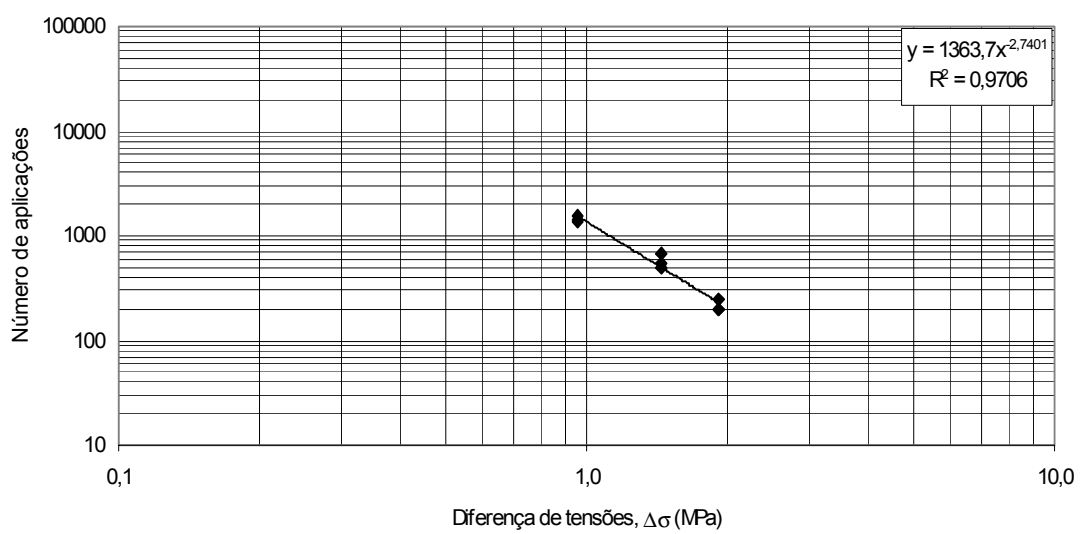
**Tabela 4.8:** Resultado dos ensaios de MR, RT e da relação MR/RT

Tipo de mistura	MR	RT	MR/RT
	(MPa, 25°C)	(MPa, 25°C)	
I	3200	1,2	2667
II	4776	1,3	3674
III	7524	1,3	5787
IV	8901	1,6	5663

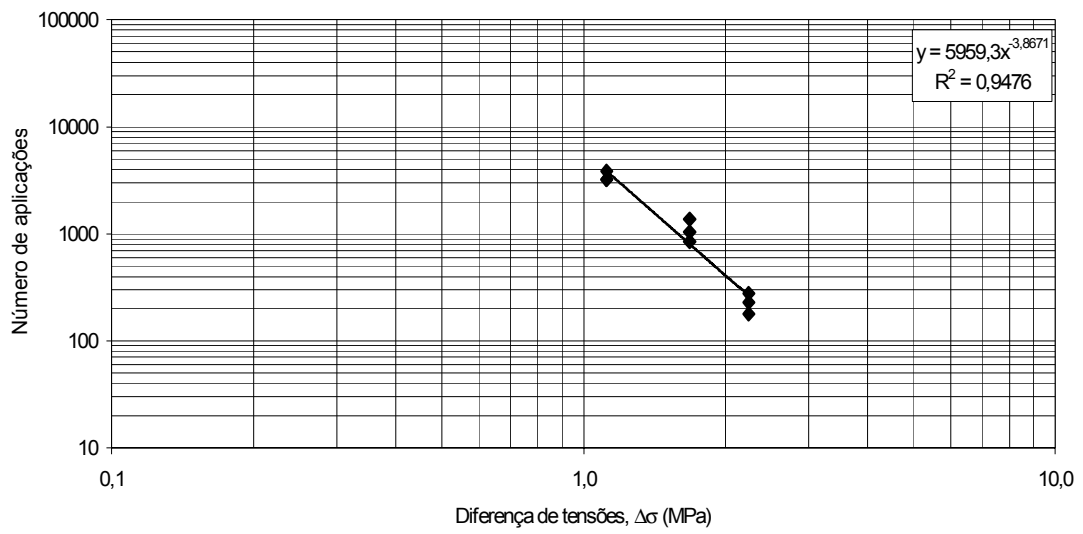
Os ensaios de vida de fadiga a compressão diametral e tensão controlada para os quatro tipos de misturas foram feitos a temperatura de 25°C (Figura 4.5), para níveis de tensão igual a 20%, 30% e 40% da RT. Os gráficos com as curvas de fadiga são apresentados nas Figuras 4.7 a 4.10.



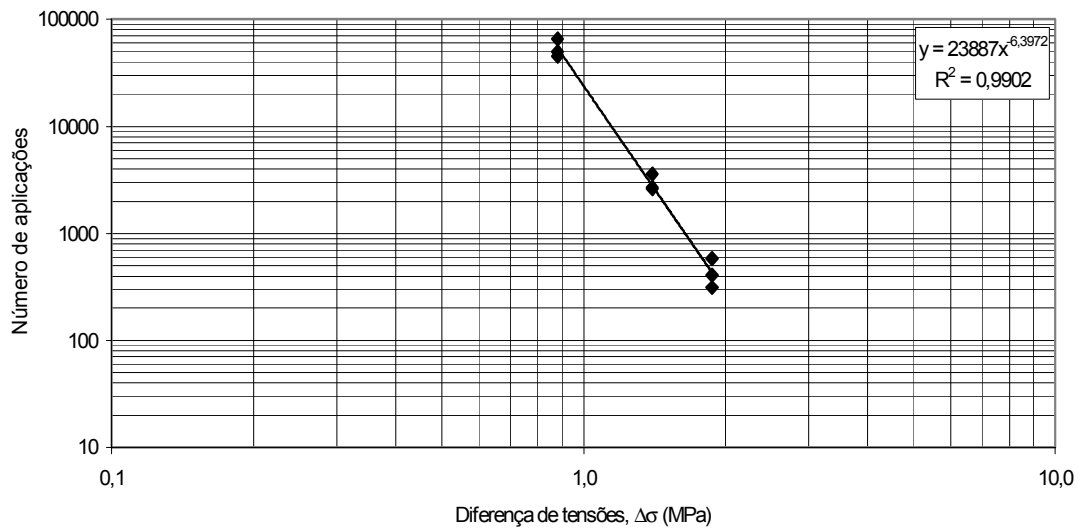
**Figura 4.6:** Ensaio de fadiga



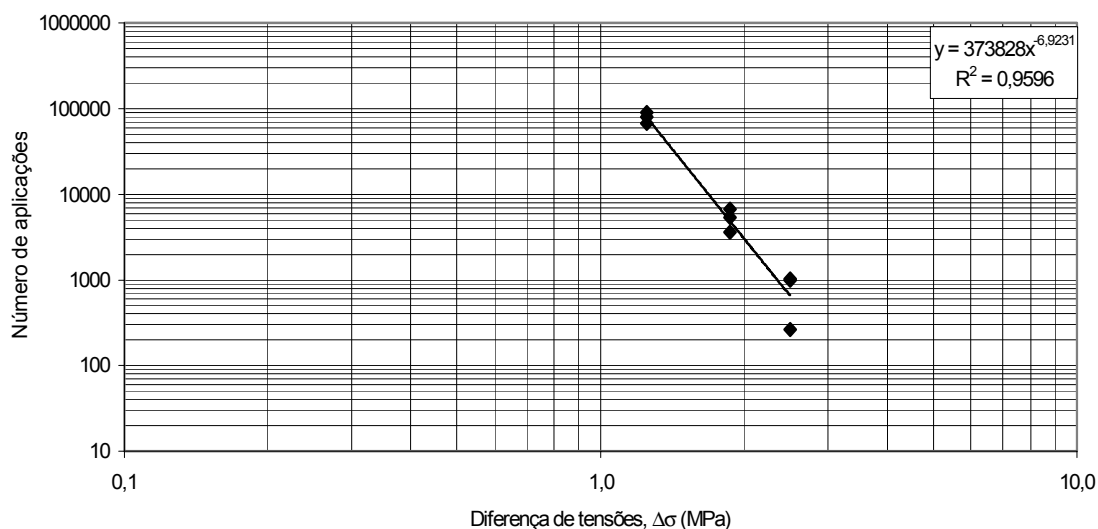
**Figura 4.7:** Vida de fadiga para Mistura I



**Figura 4.8:** Vida de fadiga para Mistura II



**Figura 4.9:** Vida de fadiga para Mistura III



**Figura 4.10:** Vida de fadiga para Mistura IV

## 4.1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste item apresentamos as discussões sobre a dosagem das misturas asfálticas recicladas e os resultados dos ensaios de RT, MR e vida de fadiga para as quatro misturas estudadas.

### 4.1.1 Dosagem Marshall

Para cada tipo de mistura estudada, foram moldados no teor de projeto escolhido, quinze corpos de prova para determinação das propriedades mecânicas. Foram feitas também três misturas para a determinação da DMT em cada teor de projeto.

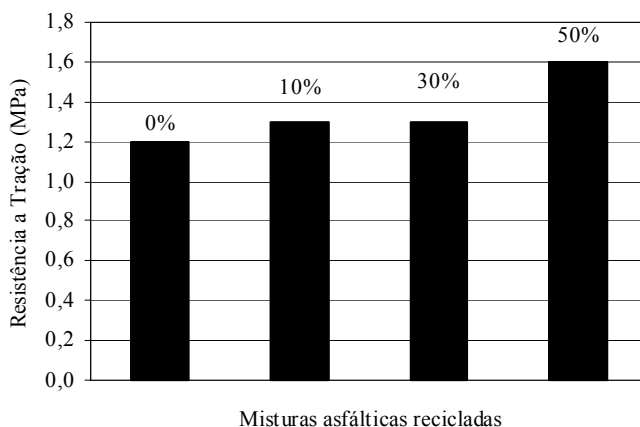
Obteve-se uma média para cada um dos parâmetros volumétricos da mistura compactada. Para a mistura I, CBUQ convencional, os valores destes parâmetros atenderam as especificações do método de dosagem para o teor de projeto, o mesmo acontecendo para as misturas II (10% de fresado) e IV (50% de fresado). A mistura III (30% de fresado), teve o valor médio de RBV ligeiramente abaixo do recomendado, o que foi considerado razoável até porque os outros dois parâmetros Vv e VAM atenderam aos requisitos especificados. Os Vv para as quatro misturas variaram dentro do intervalo especificado para misturas asfáltica densas (3% a 5%), ficando em torno do

valor médio de 4%, o que é recomendado para um bom desempenho das misturas a deformações permanentes e trincamentos por fadiga quando submetidas ao esforço do tráfego.

#### 4.1.2 Resistência à tração por compressão diametral

Foram feitas três determinações de RT para cada tipo de mistura estudada. Os valores médios destas medidas apresentaram resultados superiores, quando comparados com resultados de CBUQ convencionais moldados na faixa C (Soares et al., 1999, 2000).

Observou-se uma tendência de aumento da RT com um aumento do teor de fresado (Figura 4.11), com exceção da mistura II onde o valor médio calculado foi igual ao valor médio da mistura III. Todas as misturas mantiveram as mesmas granulometrias, variando somente o teor de fresado e o teor de asfalto (teor de projeto).



**Figura 4.11:** Valores de RT

A mistura sem fresado apresentou valor médio de RT acima dos valores apresentados por misturas convencionais (faixa C). Para as misturas estudadas foram encontrados os seguintes valores; 1,20, 1,30, 1,30 e 1,60 MPa, respectivamente, para as misturas I, II, III, e IV, o que leva a indicação de que um outro fator, diferente da quantidade de material fresado, poderia ser o responsável por esta elevação. A adição de

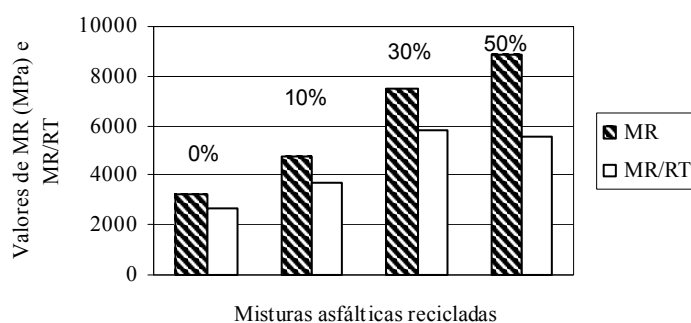
filer em misturas do tipo CBUQ apresenta variações no comportamento mecânico. Motta e Leite (2000), analisando o efeito de três tipos de fileres em CBUQ utilizando CAP 20, verificaram que as misturas asfálticas com o filer do tipo pó calcáreo apresentaram maiores resistências à tração em relação aos outros dois tipos de fileres (cimento Portland e pó-de-pedra).

#### **4.1.3 Módulo de Resiliência**

Os resultados de MR a 25°C para as quatro misturas apresentaram valores médios crescentes com a quantidade de material fresado utilizado. Foram feitas três determinações para cada tipo de mistura, sendo apresentada a média destas três determinações. A mistura I apresentou valores compatíveis com os valores médios para CBUQ que variam em média de 2000 à 4000 MPa (25°C,  $\mu = 0,30$ ), enquanto as outras misturas apresentaram valores mais elevados, o que demonstra um aumento na rigidez.

Os ensaios de MR apresentaram uma maior variação nos valores medidos nas misturas com maior quantidade de fresado, exceção feita à mistura II onde ocorreu a menor dispersão. A mistura IV apresentou a maior dispersão nos resultados, seguida da mistura III e da mistura I.

As relações MR/RT também apresentaram valores crescentes com o aumento no teor de fresado, exceção para mistura IV que apresentou uma relação inferior as demais, apresentando as quatro misturas valores médios de MR da ordem de 4400 vezes a RT. Motta e Pinto (1994) encontraram a seguinte relação,  $MR = 4283RT$ , enquanto o procedimento DNER PRO 269/96 usado em projetos de reabilitação de pavimentos indica  $MR = 5000RT$  (Motta, 1998). Soares et al., (1999) usando o mesmo ligante asfáltico virgem e agregados da mesma região da presente pesquisa encontraram a seguinte relação  $MR = 3400RT$ . Benevides (2000) obteve uma relação para MR de aproximadamente 3000 vezes a RT, também usando o mesmo ligante e agregados utilizados nesta pesquisa. A Figura 4.12 mostra a variação de MR e da relação MR/RT para as quatro misturas.



**Figura 4.12:** Gráfico de MR e MR/RT para as misturas recicladas

A rigidez de uma mistura betuminosa é função da rigidez do ligante asfáltico e do Vv (Shell, 1990). O Vv praticamente permanece constante para todas as misturas, enquanto o ligante aparenta sensibilidade com o teor do filer usado, isto é, a presença do pó calcáreo parece interferir na rigidez do ligante presente na mistura, aumentando sua viscosidade, refletindo no MR da mistura. Um outro fator importante e responsável pelo aumento da rigidez em misturas asfálticas recicladas é o tipo e a proporção na mistura asfáltica do AR. A proporção contida na mistura de AR foi definida com base na viscosidade do CAP recuperado. Processos diferentes de recuperação do ligante envelhecido leva a obtenção de CAP contaminado com o solvente utilizado na extração, produzindo um CAP com viscosidade diferente daquele contido no material fresado, mascarando assim o resultado da determinação da porcentagem de AR necessária para trazer a mistura para a viscosidade definida no processo de dosagem.

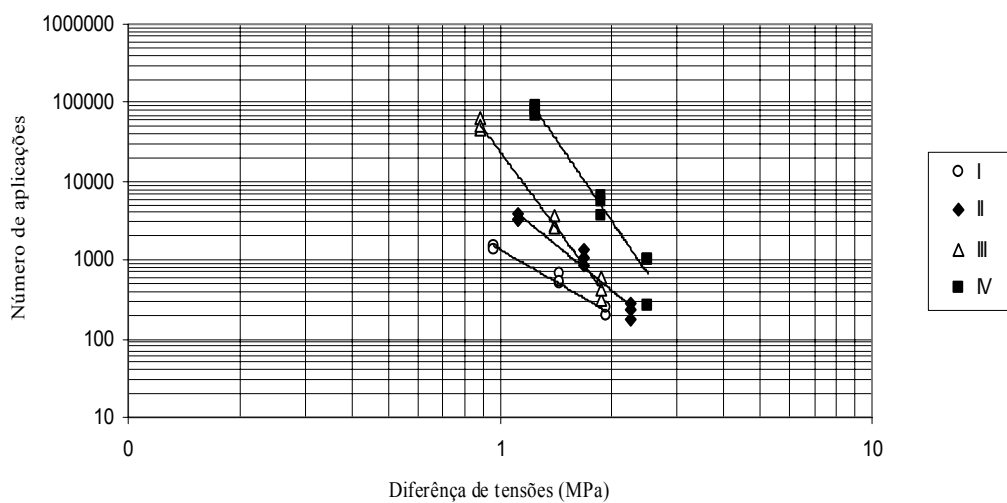
#### 4.1.4 Vida de fadiga

A curva de vida de fadiga das quatro misturas analisadas apresentaram um bom coeficiente de regressão ( $R^2$ ), indicando que as equações das curvas de tendência servem para prever as variáveis explicadas (número de repetições), a partir das variáveis explanatórias (variação de tensões).

A curva para mistura I apresentou o menor número de repetições de carga para todos os níveis de tensão. Verificou-se uma elevação nos números de repetições das misturas, com o aumento do teor de material fresado. A diferença na vida de fadiga da

mistura IV em relação à mistura I, para baixos níveis de tensão (20% da RT) é da ordem de 54 vezes, diminuindo esta diferença com o aumento no estado de tensão. Essa diminuição repetiu-se em relação às misturas II, III, e IV.

Para um dado nível de tensão das misturas estudadas houve um aumento na vida de fadiga, com o aumento do teor de material fresado, indicando que as misturas com maior MR apresentaram maior vida de fadiga, ficando visível que um aumento na rigidez do ligante das misturas recicladas, reflete na vida de fadiga delas.



**Figura 4.13:** Vida de fadiga para as misturas estudadas

Baseado nos resultados apresentados para a vida de fadiga das quatro misturas estudadas, verificou-se que a mistura IV apresentou melhor vida útil ao trincamento por repetições de carga, embora se verifique a necessidade de analisá-la em um sistema de várias camadas (pavimento), verificando o comportamento estrutural como um todo (revestimento + camadas subjacentes) e avaliando então se esta mistura possui um desempenho satisfatório ou não.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

Para esta pesquisa de caracterização de misturas asfálticas recicladas, foram estudadas quatro tipos de misturas; a primeira sem a presença de material fresado, que serviu como parâmetro de comparação para as demais misturas, a segunda com um teor de 10% de material fresado em peso total da mistura, a terceira e a quarta com teores de 30% e 50%, respectivamente.

Para a confecção destas misturas utilizou-se um material fresado mecanicamente a frio, proveniente da Av. Eng. Santana Júnior, em Fortaleza-Ce. Os agregados constituintes das misturas foram selecionados de uma pedreira comercial na região metropolitana de Fortaleza, onde se deram os estudos. O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi produzido na unidade da PETROBRAS em Fortaleza (LUBNOR), a partir do petróleo venezuelano Bachaquero. O asfalto foi classificado com base na sua penetração como um CAP 50/60 e PG (64-16) nas especificações SUPERPAVE. O agente rejuvenescedor AR-75, utilizado nas misturas onde se colocou material fresado, também foi fabricado na mesma unidade produtora do CAP. Todos os materiais virgens usados nesta pesquisa atenderam as normas vigentes do DNER.

As misturas com material fresado foram dosadas conforme a metodologia do *Asphalt Institute* para misturas betuminosas recicladas a quente, e tiveram as granulometrias dos agregados mais material fresado enquadrados na faixa C do DNER. As moldagens dos corpos-de-prova seguiram a metodologia Marshall para misturas betuminosas. A viscosidade final requerida para a mistura ligante envelhecido, ligante novo e AR foi de 3000P.

Foram executados os seguintes ensaios para a caracterização mecânica das misturas: ensaio de resistência à tração (RT), módulo de resiliência (MR), e vida de fadiga, todos realizados a 25°C.

Para a determinação da RT, utilizaram-se três corpos de provas para cada tipo de mistura, sendo considerado o valor médio dessas determinações. Os valores apresentados para estas misturas variaram de 1,20 a 1,60 MPa.

Os mesmos números de corpos-de-prova utilizados nos ensaios de RT foram utilizados para as determinações de MR. Os resultados para o MR das misturas estudadas apresentaram valores crescentes com o aumento do teor de fresado, o que confirmou os resultados obtidos por outros pesquisadores, onde há um aumento na rigidez das misturas quando se usa material asfáltico envelhecido na composição de misturas novas. Esse aumento de rigidez pode estar relacionado aos seguintes fatores:

- Valores inadequados da viscosidade do asfalto recuperado, devido a problemas de contaminação pelo solvente utilizado na recuperação do ligante extraído do revestimento asfáltico fresado, influenciando a determinação do teor de AR necessário para rejuvenescer adequadamente o ligante asfáltico envelhecido;

- Problemas relacionados ao tempo de mistura do AR e os outros componentes da mistura, o que ocasionaria perda na eficiência do AR no restabelecimento das propriedades reológicas do asfalto envelhecido, deixando o ligante com viscosidade elevada, influenciando a rigidez final da mistura asfáltica;

- O efeito de uso de filer artificial de pó calcáreo, o que segundo alguns pesquisadores, tem contribuído para um aumento na rigidez do ligante, com reflexo na rigidez da mistura asfáltica.

Os efeitos desse aumento de rigidez foram observados para as misturas recicladas, aumentando esse valor com o aumento da quantidade de material fresado colocado. É importante notar que os principais fatores que influenciam os valores de MR como, granulometria,  $V_v$ , tipo e teor de CAP, somente o último variou devido à influência da presença de material fresado.

Os resultados obtidos para a vida de fadiga mostraram um aumento no número de golpes necessários para levar os corpos-de-prova ao trincamento aumentando com a quantidade de fresado presente na mistura. Ou seja, misturas com maior teor de fresado apresentaram maior vida de fadiga para cada nível de tensão analisado.

Embora o problema de fadiga não se restrinja somente à capa de revestimento asfáltico, devendo também ser analisado todo o conjunto revestimento/pavimento, o que se observou em outros estudos apresentados é que misturas com elevada rigidez são mais propensas ao desenvolvimento de trincamento por fadiga. Para níveis de tensão mais elevados não se verificou uma variação muito grande nos valores de vida de fadiga para as quatro misturas estudadas.

Avaliando conjuntamente todos os três parâmetros mecânicos estudados (RT, MR e fadiga) para as quatro misturas realizadas, concluiu-se para as três misturas com presença de material fresado, que:

- Os valores apresentados de RT para as quatro misturas variaram de 1,20 a 1,60 MPa, foram considerados satisfatórios, e superiores aos valores reportados na literatura para misturas de CBUQ convencional moldados na faixa C do DNER, e utilizando o mesmo ligante.
- Os resultados para o MR apresentaram valores crescentes com o aumento do teor de fresado, indicando um aumento na rigidez nas misturas.,
- As misturas com maiores teores de fresado apresentaram maiores vida de fadiga para cada nível de tensão analisado.
- A elevada rigidez das misturas avaliadas indicou um não completo rejuvenescimento do ligante envelhecido por parte do AR.

- Avaliando conjuntamente todos os três parâmetros mecânicos estudados (RT, MR e fadiga), concluiu-se que a mistura IV apresentou um melhor comportamento mecânico, quando comparada as demais misturas.

Mais estudos com reciclagem deverão ser feitos até que se forme uma massa crítica de informações, possibilitando uma tomada de decisão quanto a melhor relação entre materiais novos e reaproveitados que deverão fazer parte da nova mistura projetada.

## **5.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

A partir deste trabalho abre-se a porta para que surjam futuras pesquisas sobre misturas asfálticas recicladas. A investigação mais acurada das propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas leva a necessidade de se aprofundar estudos relacionados com assuntos de importância para o sucesso das dosagens envolvendo asfaltos reciclados. Assim sugere-se que mais pesquisas sejam feitas visando uma melhor compreensão do comportamento das misturas recicladas.

Novas pesquisas deverão ser orientadas no intuito de se averiguar a eficiência no processo de recuperação do asfalto extraído do material fresado, tendo em vista que determinações incorretas na medição da viscosidade, devido à contaminação do ligante com o solvente, levam a erros apreciáveis no teor do AR.

Deve-se averiguar também a influência do tipo e teor de filler na mistura asfáltica reciclada, procurando determinar a possível influência do mesmo na rigidez da mistura.

Estudos para a dosagem de reciclados utilizando a metodologia SUPERPAVE, deverão ser avaliados, a fim de que se obtenha uma mistura final dosada com base em parâmetros volumétricos e de desempenho.

Métodos para a determinação da vida de fadiga que levem em consideração a relação entre deformação crítica de tração e a deformação de tração inicial em ensaios a

TC, deverão ser testados, uma vez que o parâmetro de número de golpes até o rompimento do corpo de prova não tem se mostrado suficientemente eficiente, em virtude das variações estatísticas dos valores apresentados para a determinação da resistência a tração.

Deve-se proceder estudos que levem em consideração modelos de caracterização do comportamento viscoelástico de misturas asfálticas recicladas através de ensaios de *creep*, obtendo parâmetros de deformações permanentes em função do tempo de carregamento, avaliando a influência do carregamento repetido nas deformações plásticas e viscoplásticas.

Escolher um “parâmetro” para se acompanhar o envelhecimento do ligante asfáltico tentando prever o tempo de vida útil do mesmo.

Por último verificou-se a necessidade da implantação de um trecho experimental com revestimento asfáltico reciclado, viabilizando a medição das suas propriedades mecânicas, a partir de amostras retiradas *in situ*, medições deflectométricas e monitoramento de defeitos superficiais, ao longo da sua vida útil, possibilitando uma melhor avaliação do desempenho da mistura submetida a um carregamento real de tráfego.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVIM, I.M. (1999) *Fresagem & Reciclagem de Pavimentos e Suas Aplicações na Restauração de Rodovias*. [www.fresar.com.br](http://www.fresar.com.br).
- ANDERSON, M.; TURNER, P. e PETERSON, B. (2001) Making RAP Working SUPERPAVE. *The magazine of the Asphalt Institute*, Asphalt Institute. Lexington, Kentucky.
- ARAÚJO, L.M.D.; FARIAS, M.M. e JÚNIOR, F.M.V. (2001) Estudo de Propriedades Mecânicas de Material Fresado Visando Incorporação em Camadas de Base Rodoviária. *Second International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control*,. Alabama, USA.
- ASPHALT INSTITUTE (1989) *The Asphalt Handbook*. Manual series nº 4, Lexington, KY, USA.
- ASPHALT INSTITUTE (1995) *Asphalt Hot-mix Recycling*. Manual series nº 20, Lexington, KY, USA.
- ASPHALT INSTITUTE (1995) *Mixing Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-mix Types*. Manual series nº 2, Lexington, KY, USA.
- BEHRENS, M.L.; DVORAK, B.I. e WOLDT, W.E. (1999) *Comparison of Asphalt Extraction Procedures: Implications Of Hidden Environmental and Liability Cost*. TRB. National Research Council, Washington, D.C.
- BENEVIDES, S.A.S. (2000) Análise Comparativa dos Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos-Empírico do DNER e Resiliência da COPPE/UFRJ em Rodovias do Ceará. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- BONFIM, V. (2001) *Fresagem de Pavimentos Asfálticos*. Ed. Fazenda Arte, São Paulo, SP.
- BUKOWSKI, J.R. (1997) Guidelines for the Design of Superpave Mixture Containing Reclaimed Asphalt Pavement (*RAP*), FHWA Superpave Mixture Expert Task Group, Washington, D.C.
- BURR, B.L.; DAVISON, R.R.; GLOVER, C.J. e BULLIN, J.A. (1990) Solvent Removal from Asphalt. *Transportation Research Board-TRB* 1269. pp 1-8, Washington, DC.
- BURR, B.L.; GLOVER, C.J. e BULLIN, J.A., (1993) New Apparatus and Procedure for the Extraction and Recovery of Asphalt Binder from Pavement Mixtures. *Transportation Research Record-TRR* 1391, National Research Council, Washington. D.C.
- CAPUDI, G.G.; LEITE, L. M.; JUNIOR, F.A. e GIAMPAGLIA, H.R. (1990) Emprego do Resíduo Pesado de Óleo de Xisto como Agente de Reciclagem para Asfaltos. *Anais do 10 °IBP*. Rio de Janeiro.
- CASTRO NETO, A. (2000) *Proposta de projeto de dosagem de concreto betuminoso reciclado a quente*. Tese de Mestrado, EPUSP, São Paulo.
- CASTRO NETO, A.M. e BERNUCCI, L.B. (2000) Proposta de Dosagem de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente. *Anais do 15 °IBP*. Rio de Janeiro.
- CIPIONE, C.A.; DAVISON, R.R.; BURR, B.L.; GLOVER, C.J. e BULLIN, J.A. (1991) Evaluation of Solvents for Extraction of Residual Asphalt from Aggregates. *Transportation Research Record* 1323, TRB. National Research Council, Washington, D.C.

- COELHO,V. (1994) Considerações Sobre Deformações Permanentes em Camadas Asfálticas de Pavimentação. Anais do 12º IBP. Rio de Janeiro.
- DAVIDSON, D.D.; CANESSA, W. e ESCOBAR, S.J. (1978) Practical Aspects of Reconstituting Deteriorated Bituminous Pavements. ASTM STP 662 L.E. Wood, Ed. American Society for Testing and Materials, USA.
- DECKER, D. (1997) Hot Mix Recycling: State-of-the-Practice. *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists-AAPT*, vol. 66, USA.
- DUNNING, R.L. e MENDENHAL, R.L. (1978) Design of Recycled Asphalt Pavements and Selection of Modifiers. ASTM STP 662 L.E. Wood, Ed. American Society for Testing and Materials, USA.
- EPPS, J. (1997) Hot in Place Recycling: State-of-the-Practice. *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists-AAPT*, vol. 66, USA.
- EPPS, J.A.; LITTLE, D.N.; O'NEAL, R.J e GALLAWAY, B.M. (1978) Mixture Properties of Recycled Central Plant Materials. ASTM STP 662 L.E. Wood, Ed. American Society for Testing and Materials, USA.
- FALCÃO, M.F.B. e SOARES,J.B. (2002a) Discussão Sobre os Modos de Ruptura Observados no Ensaio de Compressão Diametral. *XVI Encontro de Asfalto do Instituto brasileiro de Petróleo e Gás*, IBP, Rio de Janeiro.
- FALCÃO, M.F.B. e SOARES,J.B. (2002b) Considerações Sobre o Ensaio de Compressão Diametral no Estudo de Materiais de Pavimentação. *XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Natal.
- FHWA (1996) *Pavement Recycling Executive Summary and Report*. Federal Highway Administration, USA.

- FHWA (1997) *Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments*. Federal Highway Administration, USA.
- FHWA (1994) *Background of SUPERPAVE Asphalt Binder Test Methods*. Federal Highway Administration-FHWA-SA-94-069, Washington, D.C.
- GARCIA, H. C.; TIA, M.; ROQUE, R. e CHOUBANE, B. (2000) An Evaluation of an Alternative Solvent for Extraction of Asphalt to Reduce Health and Environmental Hazards. *Transportation Research Board-TRB*, Washington, D.C.
- GARDINER, M. S. e WAGNER, C. (1999) Use of RAP in Superpave HMA Applications. *Transportation Research Board-TRB*, National Research Council. Washington, D.C.
- HOSSAIN, M.; METCALF, D.G. e SCOFIELD, L.A. (1993) Performance of Recycled Asphalt Concrete Overlays in Southwestern Arizona. *Transportation Research Record 1427*, p. 30-37, TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- HUFFMAN, J.; BROWN&BROWN e KANSAS, S. (1997) Full-Depth Pavement Reclamation, State-of-the-Practice. *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists-AAPT*, vol.66, USA.
- KANDHAL, P. (1997) Recycling of Asphalt Pavements-an Overview. *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists-AAPT*, vol. 66, USA.
- KANDHAL, P. e FOO, K.Y. (1997) Design Recycled Hot Mix Asphalt Mixture Using Superpave Technology, *National Center for Asphalt Technology-NCAT Report n° 96-5*, USA.
- KANDHAL, P.S. e COOLEY JR., L.A. (2001) The Restricted Zone in the SUPERPAVE Aggregate Gradation Specification. *National Cooperative Highway Research Program-NCHRP*, Report 464, USA.

- KANDHAL, P.S.; RAO, S.S.; WATSON, D.E. e YOUNG, B. (1995) Performance of Recycled Hot-Mix Asphalt Mixture in Georgia. *Transportation Research Record 1507*, TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- KEARNEY, E. (1997) Cold Mix Recycling State-of-the-Practice. *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists-AAPT*, Vol. 66, USA.
- KENNEDY, T.W.; MOULTHROP, J. S. e HUBER, G.A. (1993) Development of SHRP Mixture Specification and Design and Analysis System. *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists-AAPT*. Vol. 62, USA.
- KENNEDY, T.W. e PEREZ, I. (1978) Preliminary Mixture Design Procedure for Recycled Asphalt Materials. ASTM STP 662 L.E. Wood, Ed. American Society for Testing and Materials, USA.
- LEE, K.W.; SOUPHARATH, N.; SHUKLA, A.; FRANCO, C.A. e MANNING, F. J. (1999) Rheological and Mechanical Properties of Blended Asphalt Containing Recycled Asphalt Pavements Binders. *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists-AAPT*. Vol. 68, USA.
- LEE, T.; TERREL, R.L. e MAHONEY, J. P. (1983) Test for Efficiency of Mixing of Recycled Asphalt Paving Mixture. *Transportation Research Record 911*, TRB, National Research Council. Washington. D.C.
- LEITE, M.F.L. e MOTTA, L.M.G. (2002) O Efeito do Filer nas Características do Ligante Asfáltico. *XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET*, Natal, RN.
- LOUREIRO, T.G., SOARES, J.B. E MOTTA, L.M.G. (2003) Estudo Sobre o Dano Progressivo em Misturas Asfálticas no Ensaio de fadiga à Compressão Diametral. Artigo aceito para o *XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET*, Rio de Janeiro, RJ.

- MCDANIEL, R. e ANDERSON, R.M. (2001) Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: *Technician's manual*. NCHRP Report nº 452. USA.
- MEDINA, J. (1997) *Mecânica dos Pavimentos*. Ed. UFRJ, RJ.
- MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G.; PINTO, S. e LEITE, L.M., (1990) Um Estudo de Fadiga de Misturas Asfálticas com Seis Cimentos Asfálticos da Petrobrás. *Anais do 10º IBP*, Rio de Janeiro.
- MIGLIORI, F. e CORTÉ, J.F. (1998) Comparative Study of RTFOT and PAV aging Simulation Laboratory Test. *TRB. National Research Council*, Washington, D.C.
- MOMM, L. (2000) Fadiga dos Concretos Asfálticos-Estudo da Granulometria. *Anais do 15º IBP*. Rio de Janeiro.
- MOTTA, L.M.G. (1991) Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- MOTTA, L.M.G. (1998) Contribuição para Estimativa do Módulo Resiliente de Mistura Asfáltica. *Anais do 14º IBP*, Rio de Janeiro.
- MOTTA, L.M.G.; TONIAL, I.; LEITE, L.M. e CONSTANTINO, R.S. (1996) *Curso sobre Programa SHRP: Aplicação a Ligantes Agregados e Misturas Betuminosas*, IBP, Rio de Janeiro.
- NOURELDIN, A.S. e WOOD, L.E. (1989) Use of Nondestructive Tests to Evaluate Hot Mix Recycled Asphalt Pavements. *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists-AAPT*, vol 58, USA.

- PAUL, H.R. (1996) Evaluation of Recycled Projects for Performance. *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists-AAPT*, vol.65, USA.
- PETERSON, G.D.; DAVISON, R.R.; BURR, B.L.; GLOVER, C.J. e BULLIN, J.A. (1994) Effect of Composition on Asphalt Recycling Agent Performance. *Transportation Research Record 1436*, TRB. National Research Council, Washington, D.C.
- PETERSON, R.L.; SOLEYAMANI, H.R.; ANDERSON, R.M. e MCDANIEL, R.S. (2000) Recovery and Testing of RAP Binders from Recycled Asphalt Pavements. *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists-AAPT*, Vol. 69, USA.
- PINTO, S. (1991) *Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos*, Tese de Doutorado em engenharia civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- PREUSSLER, E. S. (1983) *Estudo de Deformação Resiliente de Pavimentos Flexíveis e Aplicação ao Projeto de Camadas de Reforço*. Tese de Doutorado em engenharia civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S; BROWN, R.E.; LEE, D. e KENNEDY, Y. T. W. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. NAPA, Maryland, USA.
- SHELL (1990) *The Shell Bitumen Handbook*, Shell Bitumen U.K.
- SHRP (1994a) *Superior Performing Asphalt Pavements (SUPERPAVE): The Products of the SHRP Asphalt Research Program. Strategic Highway Research Program A-410*. National Research Council, Washington, D.C.

- SHRP (1994b) *The SUPERPAVE Mix Design System Manual of Specification, Test Methods, and Practices*. Strategic Highway Research Program A-379, National Research Council, Washington, D.C.
- SOARES, J.B.; MOTTA, L.M.; LEITE, L.M. e BRANCO, J. V.C. (1999) O Efeito da Consistência do CAP no Teor Ótimo e nas Propriedades das Misturas Asfálticas. *XIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET*, vol. 1, São Carlos, SP.
- SOARES, J. B.; MOTTA, L. M.G. e BENEVIDES, S. A. (2000a) Dimensionamento Mecânico de Reforço Considerando Alternativa de Base com Revestimento Fresado Incorporado. *Simpósio Internacional de Manutenção e Restauração de Pavimentos e Controle Tecnológico*. São Paulo.
- SOARES, J.B.; FREITAS, F. A.C.; BRANCO, J.V.C. e MOTTA, L.M.G. (2000b) Método de Previsão do Teor Ótimo de Ligante em Mistura Asfáltica tipo CBUQ. *Anais da 32ª RAP*, Brasília, DF.
- SOARES, J.B.; MOTTA, L.M.G.; PAIVA, J.A.A. e BRANCO, J.V.C. (2000c) Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com Variação de Granulometria e de CAP. *Anais do 15º Encontro de Asfalto*, IBP, Rio de Janeiro, 9-19.
- SOARES, J.B., ALDIGUERI, D.R. e LEITE, L.M. (2002) Métodos de Dosagem e Caracterização Mecânica Asfálticas Recicladas a Quente. Relatório interno. Laboratório de Mecânica dos Pavimentos, UFC-Ce.
- SOLAIMANIAN, M. e TAHMORESSI M. (1995) Variability Analysis of Hot-Mix Asphalt Concrete Containing High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement. *Transportation Research Record 1543*, TRB. National Research Council, Washington, D.C.

- SOLEYMANI, H.R, BAHIA, H. e BERGAN A.T. (1999) Blending Charts Based on the Performance-graded (PG) asphalt binder specification. *Transportation Research Board*, Washington, D.C.
- SOLEYMANI, H.R.; BAHIA, H.U. e BERGAN, A.T. (1999) Time-Temperature Dependency of Blended and Rejuvenated Asphalt Binders. *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologist-AAPT*. Vol. 68, USA.
- TAYLOR, N.H. (1978) Life Expectancy of Recycled Asphalt Paving, ASTM STP 662 L.E. Wood, Ed. American Society for Testing and Materials, USA.
- TERREL, R. L.; EPPS, J.A. e SORENSON, J.B. (1997) Hot-in-Place Recycling State of the Practice. *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists-AAPT*, Vol. 66, USA.
- TERREL,R.L. e FRITCHEN, D.R. (1978) Laboratory Performance of Recycled Asphalt Concrete. *ASTM STP 662* L.E. Wood, Ed. American Society for Testing and Materials, USA.
- USACE (2000) *Hot-Mix Asphalt Paving Handbook*, U.S ARMY CORPS OF ENGINEERS, USA.
- VASCONCELOS, K.L; SOARES, J.B. e LEITE, L.M. (2003) Influência da Densidade Máxima Teórica na Dosagem de Misturas Asfálticas. Artigo aceito para o *XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET*, Rio de Janeiro, RJ, a ser publicado na Revista Transportes de 2004.