

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUIAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS II – CAMPINA GRANDE

ESTUDO COMPARATIVO DE CONCRETO BETUMINOSO USINADO
À QUENTE UTILIZANDO-SE AGREGADO CALCÁRIO, CAP PURO E
CAP POLIMERIZADO

por

João Carlos de Moura Leal

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba-
Campus II- Campina Grande, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA

Campina Grande-Paraíba
Março/1999

JOÃO CARLOS DE MOURA LEAL

**ESTUDO COMPARATIVO DE CONCRETO BETUMINOSO USINADO
À QUENTE UTILIZANDO-SE AGREGADO CALCÁRIO, CAP PURO E
CAP POLIMERIZADO**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba-
Campus II- Campina Grande, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA

Orientador: Prof. **JOSÉ AFONSO G. MACÊDO**
DEC/CCT/UEPB

Campina Grande-Paraíba
Março/1999



L435e Leal, João Carlos de Moura.
Estudo comparativo de concreto betuminoso usinado à quente utilizando-se agregado calcário, cap puro e cap polimerizado / João Carlos de Moura Leal. - Campina Grande, 1999.
115 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1999.
"Orientação : Prof. Dr. José Afonso Gonçalves de Macêdo".
Referências.

1. Geotécnica. 2. Betuminosas - Materiais. 3. Brita Calcária. 4. Concreto Betuminoso - Pavimentação. 5. Dissertação - Engenharia Civil. I. Macêdo, José Afonso Gonçalves de. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 624.13(043)

**ESTUDO COMPARATIVO DE CONCRETO BETUMINOSO
USINADO À QUENTE UTILIZANDO-SE AGREGADO
CALCÁRIO, CAP PURO E CAP POLIMERIZADO**

Candidato: Engenheiro **JOÃO CARLOS DE MOURA LEAL**

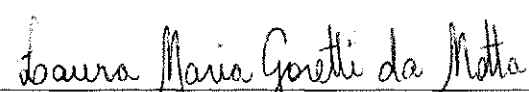
Dissertação submetida ao corpo docente do curso de pós-graduação em engenharia civil da Universidade Federal da Paraíba, Campus II - Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**

Aprovada em 26 de março de 1999

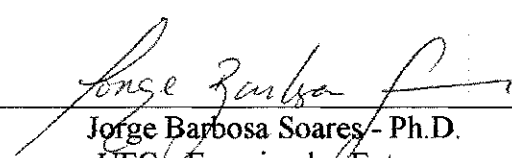
Banca Examinadora:



Prof. José Afonso Gonçalves de Macêdo - D.Sc.
DEC/CCT/UFPB - Orientador



Prof.ª Laura Maria Goretti da Motta - D.Sc.
COPPE/UFRJ - Examinador Externo



Jorge Barbosa Soares - Ph.D.
UFC - Examinador Externo

Campina Grande/Paraíba
Março/1999

DEDICATÓRIA:

Aos meus pais

José de Moura Leal
Isabel M. de Moura Leal
e
Irmãos

AGRADECIMENTOS

- A DEUS, por ter-me concedido aptidão e paciência para a realização desta pesquisa;
- Aos professores José Afonso Gonçalves de Macêdo e Francisco Barbosa de Lucena, pela constante orientação e dedicação na realização deste trabalho;
- Aos professores e funcionários da área de geotecnia pelas contribuições prestadas;
- Ao técnico Roberes Ramos de Almeida pela sua contribuição indispensável na realização dos ensaios e informações fornecidas;
- Ao laboratorista Antônio Bezerra pelo seu auxílio na realização dos ensaios;
- Ao técnico José Mendes (DER/PE), pela boa vontade de sua companhia em visitas técnicas de trechos experimentais nas rodovias PE-74 e PE-75;
- Ao Engenheiro da Coperbo Galvão Montenegro-COPERBO, pelas suas informações e material didático fornecido;
- A Prof^a. Laura Motta pelas contribuições e apoio concedido na realização de parte dos ensaios no laboratório de geotecnia da COPPE/UFRJ;
- Ao colega Adney (mestrando), pela sua contribuição valiosa na realização de parte dos ensaios na COPPE/UFRJ;
- Aos colegas do curso de mestrado pela contribuição e incentivo nos momentos difíceis;
- Ao CNPq, pelo seu suporte financeiro para a realização desta pesquisa, e à ATECEL pelo apoio concedido em transportes quando necessário;
- E a todos os colegas, amigos e demais que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho;
- E enfim, a minha família pelo seu apoio e presença em todos os momentos da minha vida.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS	viii
RESUMO	x
ABSTRACT	xi

CAPÍTULO - 1

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1. INTRODUÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS	3

CAPÍTULO - 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. MATERIAIS BETUMINOSOS	5
2.2.1. Origem e conceitos	5
2.2.2. Caracterização do CAP	7
2.2.3. Classificação do CAP	7
2.2.4. Propriedades do CAP	10
2.2.5. Comportamento da mistura asfáltica	12
2.3. POLÍMEROS	14
2.3.1. Introdução	14
2.3.2. Polímeros e polimerização	15
2.3.3. Classificação dos polímeros (quanto a fusibilidade)	16
2.3.4. Polímeros SBS (denominação inglês styrene-butadiene-styrene)	17
2.4. ASFALTO POLIRERIZADO	18
2.4.1. Introdução	18
2.4.2. Histórico no mundo e no Brasil	20
2.4.3. Compatibilidade	24
2.4.4. Integração do CAP com polímeros do tipo SBS	25
2.4.5. Produção industrial e armazenamento do ligante modificado	26
2.4.6. Projeto de misturas e aplicação do concreto asfáltico modificado	27
2.4.7. Temperatura de aquecimento e compactação do asfalto polímero	27

2.4.8.	Viabilidade técnica e econômica.....	27
2.4.9.	Aplicações de asfalto polimerizado.....	29
2.4.10.	Estudo de ligante modificado – Em laboratório.....	30
a.	Ensaio de tração.....	32
b.	Índice de suscetibilidade térmica (IST).....	32
c.	Estabilidade à estocagem (Resistência à estocagem).....	33
d.	Recuperação elástica (RE).....	34
e.	Envelhecimento do asfalto polímero.....	36
2.4.11.	Estudo de mistura com ligante modificado – Em laboratório.....	37
a.	Ensaio Marshall.....	37
b.	Adesividade.....	38
c.	Coesão.....	40
d.	Resistência à tração estática por compressão diametral.....	41
e.	Módulo de resiliência (MR).....	44
f.	Fadiga.....	46

CAPÍTULO – 3

3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
3.1.	INTRODUÇÃO.....	50
3.2.	ESCOLHA E COLETA DOS MATERIAIS.....	50
3.2.1.	Agregado graúdo.....	50
3.2.2.	Agregado miúdo.....	51
3.2.3.	Material de enchimento.....	51
3.2.4.	Cimento asfáltico.....	51
3.3.	PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	51
3.4.	AJUSTAGEM GRANULOMÉTRICA – MISTURA DOS AGREGADOS.....	52
3.5.	ESCOLHA DOS TEORES A SEREM UTILIZADOS.....	53
3.6.	MÉTODOS DE ENSAIOS.....	54
3.6.1.	Introdução.....	54
3.6.2.	Sequência de dosagem.....	55
3.6.3.	Parâmetros físicos e mecânicos da mistura asfáltica.....	55
3.6.4.	Características recomendadas em uma dosagem (NBR – 12891/93).....	55
3.6.5.	Metodologia aplicada na pesquisa.....	58
3.6.6.	Ensaio de compressão diametral para determinação da resistência à tração estática....	60
3.6.7.	Ensaio de módulo de resiliência.....	61
3.6.8.	Fluxograma da pesquisa.....	61

CAPÍTULO - 4

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	63
4.1. INTRODUÇÃO.....	63
4.2. GENERALIDADES DO AGREGADO GRAÚDO – CALCÁRIO.....	63
4.3. ESPECIFICAÇÕES E EXPERIÊNCIAS REALIZADAS COM CALCÁRIO.....	65
4.4. DESCRIÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS AGREGADOS.....	67
4.4.1. Introdução.....	67
4.4.2. Composição granulométrica dos agregados.....	67
4.4.3. Massa específica real e aparente do agregado graúdo, miúdo e material de enchimento.....	70
4.4.4. Ensaio de absorção.....	70
4.4.5. Índice de forma do agregado.....	71
4.4.6. Ensaio de desgaste por abrasão (Los Angeles).....	72
4.4.7. Ensaio de esmagamento.....	72
4.4.8. Ensaio de 10% de finos.....	73
4.4.9. Adesividade do agregado ao ligante betuminoso.....	74
4.4.10. Resultados obtidos após a extração do ligante.....	75
4.4.11. Considerações gerais sobre o comportamento do agregado.....	79
4.5. AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO DO CAP PURO E CAP MODIFICADO.....	80
4.5.1. Análise comparativa nas propriedades de caracterização entre os dois tipos de CAP..	80
4.5.2. Análise comparativa das misturas utilizando-se parâmetros obtidos pelo ensaio Marshall.....	84
4.5.3. Análise comparativa das misturas pelo método de módulo de resiliência.....	96
4.5.4. Análise comparativa das misturas pelo método de resistência à tração indireta.....	100
4.5.5. Resistência à tração indireta estática.....	94
4.5.6. Módulo de resiliência.....	96

CAPÍTULO - 5

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	103
5.1. CONCLUSÕES.....	103
5.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	105

CAPÍTULO - 6

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
6.1. BIBLIOGRAFIA – OBRAS REFERENCIADAS.....	106
6.2. BIBLIOGRAFIA – OBRAS CONSULTADAS.....	112

APÊNDICE A - Relação de trechos experimentais no Brasil (Experiências Práticas)

APÊNDICE B - Fotos de trechos experimentais com CAP polímero nas rodovias PE-74 e PE-75 (PERNAMBUCO)

APÊNDICE C - Especificações de asfalto polímero e asfalto puro em misturas (CBUQ)

APÊNDICE D - Análise comparativa de custo do asfalto polímero em relação ao asfalto puro

APÊNDICE E - Ensaio de trilha de rodas em misturas envolvendo os dois tipos de CAPs (Espanha)

APÊNDICE F - Resultados de resistência à tração estática e módulo de resiliência da presente pesquisa

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Morfologia do co-polímero SBS.....	20
Figura 2.2 - Ilustração do corpo-de-prova na prensa Marshall.....	38
Figura 2.3 - Ensaio de tração em amostra cilíndrica.....	43
Figura 2.4 - Distribuição de tensões de tração e compressão nos planos diametrais..	43
Figura 2.5 - Vida de fadiga (n) x deformação específica resiliente (ϵ).....	49
Figura 3.1 - Esquema de um corpo-de-prova Marshall.....	55
Figura 3.2 - Ilustração do ensaio de tração por compressão diametral.....	60
Figura 3.3 - Fluxograma da pesquisa.....	62
Figura 4.1 - Distribuição granulométrica adotada na mistura asfáltica estudada neste trabalho (Faixa B - DNER).....	68
Figura 4.2 - Análise granulométrica após a extração do ligante (Amostra de maior degradação - 6% CAP+Polímero, em energia de 75 golpes)	76
Figura 4.3 - Recuperação elástica à 10 ⁰ C (%)......	83
Figura 4.4 - Viscosidade x Temperatura, para os dois tipos de ligantes.....	83
Figura 4.5 - Estabilidade Marshall (50 golpes por face).....	88
Figura 4.6 - Estabilidade Marshall (75 golpes por face).....	88
Figura 4.7 - Fluência (50 golpes por face).....	89
Figura 4.8 - Fluência (75 golpes por face).....	89
Figura 4.9 - Volume de vazios (50 golpes por face).....	90
Figura 4.10 - Volume de vazios (75 golpes por face).....	90
Figura 4.11 - Relação betume vazios - RBV (50 golpes por face).....	91
Figura 4.12 - Relação betume vazios - RBV (75 golpes por face).....	91
Figura 4.13 - Massa específica aparente (50 golpes por face).....	92
Figura 4.14 - Massa específica aparente (75 golpes por face).....	92
Figura 4.15 - Capacidade de suporte (fórmula de Metcalf) - 50 golpes.....	95
Figura 4.16 - Capacidade de suporte (fórmula de Metcalf) - 75 golpes.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação brasileira de CAPs.....	8
Tabela 2.2 - Análise de consistência através de penetração/viscosidade.....	8
Tabela 2.3 - Estabilidade à estocagem.....	34
Tabela 2.4 - Recuperação elástica à 10 ⁰ C	35
Tabela 2.5 - Comparação do CAP puro e polimerizado.....	37
Tabela 2.6 - Perda por desgaste.....	41
Tabela 3.1 - Ajustagem granulométrica.....	53
Tabela 3.2 - Parâmetros de mistura asfáltica volumétrica (massa e volume).....	56
Tabela 3.3 - Parâmetros indicados para dosagem Marshall	57
Tabela 3.4 - Parâmetros indicados para dosagem Marshall, nas misturas com asfálticas com ligante modificado.....	57
Tabela 3.5 - Métodos de ensaios utilizados para os agregados.....	58
Tabela 3.6 - Métodos de ensaios utilizados para o cimento asfáltico.....	58
Tabela 3.7 - Métodos de ensaios utilizados para misturas betuminosas.....	59
Tabela 4.1 - Granulometria dos agregados utilizados nesta pesquisa e sua ajustagem.....	69
Tabela 4.2 - Características físicas e mecânicas dos agregados.....	73
Tabela 4.3 - Verificação do teor de ligante após a extração pela máquina rotarex	76
Tabela 4.4 - Massa específica real do agregado graúdo após a extração do ligante.....	77
Tabela 4.5 - Massa específica aparente do agregado graúdo após a extração do ligante.....	77
Tabela 4.6 - Absorção do agregado graúdo após a extração do ligante.....	77
Tabela 4.7 - Granulometria após a extração do ligante, para a compactação de 75 golpes.....	78
Tabela 4.8 - Propriedades de agregados empregados na construção rodoviária.....	79
Tabela 4.9 - Propriedades de caracterização dos ligantes.....	82
Tabela 4.10 - Recuperação elástica à 10 ⁰ C	82

Tabela 4.11 - Resumo dos valores médios para a cada teor (50 golpes por face) - E. Marshall.....	87
Tabela 4.12 - Resumo dos valores médios para cada teor (75 golpes por face) – E. Marshall.....	87
Tabela 4.13 - Parâmetros obtidos na ajustagem gráfica de dosagem Marshall para 50 golpes.....	93
Tabela 4.14 - Parâmetros obtidos na ajustagem gráfica de dosagem Marshall para 75 golpes.....	93
Tabela 4.15 - Dosagem em peso ajustada para os teores ótimos.....	93
Tabela 4.16 - Capacidade de suporte, utilizando a fórmula de Metcalf.....	94
Tabela 4.17 - Resultados de módulo de resiliência.....	96
Tabela 4.18 - Resultados de módulo de resiliência a 25 °C de outros pesquisadores...	97
Tabela 4.19 - Média e variância amostral do módulo de resiliência.....	98
Tabela 4.20 - Resistência à tração indireta.....	100
Tabela 4.21 - Estudo comparativo de resistência à tração estática entre vários estudos.....	101
Tabela 4.22 - Média e variância amostral de resistência à tração estática indireta.....	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>ABPv</i>	Associação Brasileira de Pavimentação
<i>AMP</i>	Asfalto modificado com polímeros
<i>AASHTO</i>	American Association of State Highway and Transportation Officials
<i>ASTM</i>	American Society for Testing Materials
<i>ASFOR</i>	Fábrica de asfalto de Fortaleza(Fortaleza/CE)
<i>ATECEL</i>	Associação Técnica Científica Ernesto Luiz
<i>C</i>	Capacidade de suporte
<i>CAP</i>	Cimento asfáltico de petróleo
<i>CAN</i>	Cimento asfáltico natural
<i>CBUQ</i>	Concreto betuminoso usinado à quente
<i>CCT</i>	Centro de Ciências e Tecnologia
<i>CENPES</i>	Centro de Pesquisa da Petrobrás
<i>CNP</i>	Conselho Nacional de Petróleo
<i>COPERBO</i>	Companhia Pernambucana de Borracha Sintética
<i>COPPE</i>	Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia
<i>DER</i>	Departamento de Estradas de Rodagem
<i>DEC</i>	Departamento de Engenharia Civil
<i>DNER</i>	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
<i>DNC</i>	Departamento Nacional de Combustível
<i>E</i>	Estabilidade Marshall
<i>EVA</i>	Etileno acetato de vinila
<i>F</i>	Fluência Marshall
<i>FRAASS</i>	Ponto de ruptura à frio
<i>IBP</i>	Instituto Brasileiro de Petróleo
<i>IP</i>	Índice de penetração

<i>IPR</i>	Instituto de Pesquisa Rodoviárias
<i>IST</i>	Índice de suscetibilidade térmica
<i>LUBNOR</i>	Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste
<i>MB</i>	Método brasileiro
<i>ME</i>	Método de ensaio
<i>MR</i>	Módulo de resiliência
<i>N</i>	Vida de fadiga
<i>PVC</i>	Cloreto de polivinila
<i>RBV</i>	Relação betume vazios
<i>RE</i>	Recuperação elástica
<i>REDUC</i>	Refinaria de Duque de Caxias (Duque de Caxias/RJ)
<i>RLAM</i>	Refinaria Landulpho Alves (Mataripe/BA)
<i>SBR</i>	Estireno butadieno
<i>SBS</i>	Estireno butadieno estireno
<i>SHRP</i>	Strategic Highway Research Program
<i>S.T.</i>	Suscetibilidade térmica
<i>SUPERPAVE</i>	Superior Performance Asphalt Pavements
<i>TSD</i>	Tratamento superficial duplo
<i>UFPB</i>	Universidade Federal da Paraíba
<i>UFRJ</i>	Universidade Federal do Rio de Janeiro
<i>VAM</i>	Vazios no agregado mineral
<i>V_b</i>	Volume de Asfalto(betume)
<i>V_v</i>	Volume de vazios
<i>V_t</i>	Volume total
ϵ	Deformação específica resiliente
δ	Massa específica
σ_t	Resistência à tração por compressão diametral

RESUMO

Esta pesquisa apresenta um estudo comparativo do comportamento de misturas betuminosas tipo CBUQ fabricadas com asfalto aditivado com polímero e asfalto puro, bem como a análise da viabilidade da utilização de brita calcária nas obras de construção rodoviária. A análise é realizada em laboratório por meio das propriedades físicas e mecânicas.

A verificação do comportamento do asfalto modificado com polímero é analisada por meio de ensaios convencionais de caracterização como: penetração, ponto de fulgor, viscosidade, adesividade e característica elástica representada pelo ensaio de recuperação elástica. A análise do comportamento da mistura (CBUQ) foi feita através dos parâmetros Marshall, principalmente as características de estabilidade e fluência. Também foram analisados o módulo de resiliência e resistência à tração indireta utilizando-se corpos-de-prova Marshall moldados nos teores ótimos. Utilizou-se agregado calcário na composição de todas as misturas.

Os resultados obtidos indicam que o comportamento da mistura com o ligante polimerizado foi alterado, apresentando melhor desempenho na maioria das propriedades de resistência em relação à mistura com o ligante puro. Entretanto, a melhoria do comportamento em laboratório quando analisada sob o ponto de vista de flexibilidade, não apresenta variações significativas se comparadas às misturas fabricadas com CAP puro.

ABSTRACT

A study comparing an asphalt cement 50/60 (classified by penetration) and polymer modified binder in properties of Asphalt Concrete (AC) manufactured with calcareous aggregates is presented. To make this evaluation was done laboratory test of mechanical behavior of asphalt mixture based on Marshall test, indirect tensile test and dynamic diametrical compression test, using the same granulometric composition.

The behavior of polymer modified binder was analyzed by conventional characterization tests as: penetration, flash point, viscosity, tackiness and elastic recovery.

Result obtained indicate that behavior of mixture manufactured with modified binder was altered coming a better action of resistance properties. However, in the flexibility analysis of laboratory results didn't present significant variation.

CAPÍTULO - 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1) INTRODUÇÃO

O setor rodoviário brasileiro é um dos que mais necessita de investimentos para melhoria nas condições de comodidade, conforto e segurança do usuário. Sabe-se que o Brasil é um país com característica de transporte eminentemente rodoviário, o que mostra que a malha rodoviária é o principal meio de escoamento da economia. No Brasil o transporte rodoviário responde por mais de 65% do volume de toda a carga e 95% dos passageiros numa operação que corresponde a 70% do PIB (Produto Interno Bruto). Portanto é um patrimônio que deve ser preservado e mantido em suas melhores condições.

Existe uma preocupação efetiva por parte dos pesquisadores em busca de revestimentos com melhor qualidade. Percebe-se que a melhoria das condições destes, se reflete imediatamente na redução do número de acidentes, no consumo de combustível, no custo de manutenção dos veículos, redução de tempo de viagens e outros.

Têm-se constatado que com o número crescente de veículos comerciais, o aumento de carga transportado por eixo, ação do intemperismo e, a falta de manutenção, levam ao fracasso prematuro dos pavimentos.

No pavimento flexível, o comportamento do revestimento decorrerá, fundamentalmente da qualidade do ligante asfáltico e dos agregados empregados para fabricação da mistura betuminosa. As características do ligante devem ser tais que, físico-química ou mecanicamente, se alterem, ao longo do tempo, o mínimo possível para que possa ter um desempenho que corresponda a expectativa de vida do pavimento. Tem-se o asfalto como um excelente material aglutinante, fácil de aplicar e barato, porém apresentando limitações, tais como: de apresentar tendência ao envelhecimento (oxidação), em baixas temperaturas se torna rígido e quebradiço sujeito a trincas, enquanto que em altas temperaturas amolece e flui causando deformações plásticas ao

pavimento. Portanto, o asfalto apresenta grandes alterações no comportamento de suas propriedades com a variação da temperatura.

De uma forma geral o asfalto ou Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) tem-se apresentado satisfatoriamente como ligante em pavimentos convencionais. Porém em locais onde o tráfego é intenso e com cargas pesadas (corredores de ônibus, por exemplo) tem-se necessidade de ligantes mais resistentes à deformação permanente e trincas térmicas e de fadiga em faixas de temperatura de serviço (0-80^oC, no Brasil).

Assim sendo, muitos modificadores têm sido desenvolvidos para melhorar as propriedades do asfalto em aplicações específicas. Entre os vários tipos de modificadores empregados pode-se citar os seguintes: enxofre elementar, asfalto natural e polímeros (SBR, SBS e EVA). Com o surgimento de asfalto modificado pela adição de certos aditivos, alguns estudos indicam, que sua performance tem apresentado menor suscetibilidade à temperatura, sendo rígido o suficiente para não deformar a altas temperaturas e elástico bastante a baixas temperaturas para resistir às trincas, e assim aumentando a sua durabilidade

Nos últimos anos, excelentes resultados têm sido obtidos em sistemas poliméricos que apresentam recuperação elástica e resistência mecânica à tração. Conforme relata LEITE et alii (1995) há cerca de trinta anos foi verificado que, a adição de polímero ao asfalto melhora consideravelmente suas propriedades, especialmente a resistência a fratura à baixa temperatura e ao escoamento sob condições de aquecimento elevado. Segundo MARTINHO (1995) com o aparecimento do polímero do tipo elastômero termoplástico (SBS-estireno-butadieno-estireno), abriram-se perspectivas atraentes no setor de pavimentação, pois com este produto há uma modificação estrutural a nível molecular do asfalto, sendo possível obter um produto homogêneo, estável termicamente e que supere as limitações do asfalto tradicional, destacando sobretudo o aumento da elasticidade que é uma propriedade de fundamental importância a ser considerada nos novos métodos de dimensionamento de pavimentos

Os agregados representam algo em torno de 95% em peso da mistura asfáltica, por isso desempenham importante função na performance dos pavimentos asfálticos no

que se refere a durabilidade, resistência e segurança. Em geral, os técnicos rodoviários são capazes de avaliar qual melhor agregado para construção de um revestimento asfáltico, entretanto nem sempre levam na consideração a possibilidade de aproveitamento de agregados provenientes de materiais regionais visando misturas mais econômicas, para as características de projeto. Cada vez mais torna-se necessário o desenvolvimento de ensaios confiáveis e adequados que relacionem a qualidade do agregado em seu real desempenho no campo. Os ensaios de laboratório apesar de importantes para análise comparativa de alternativas necessitam ser complementados por estudos de campo de modo a permitir a avaliação do desempenho para a solução proposta.

Pesquisadores brasileiros também têm se preocupado quanto ao uso de agregados dentro das construções, no tocante aos seus custos e qualidades. Vem-se procurando o aproveitamento de materiais locais para a obtenção de agregados que viabilizem as construções com menor custo, como a utilização de agregados obtidos a partir da britagem de concreções lateríticas, rochas calcária e seixos rolados, buscando em alguns casos a substituição da brita granítica. A área de geotecnia do DEC/CCT/UFPB, através de seus pesquisadores, há algum tempo estuda materiais alternativos para emprego em misturas betuminosas e concreto de cimento Portland.

1.2) OBJETIVOS

A presente pesquisa têm como objetivo, um estudo comparativo de concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ) utilizando-se CAP puro e CAP aditivado com polímero (estireno butadieno estireno-SBS), sendo que o agregado graúdo utilizado na composição é um não convencional e típico de nossa região que é o calcário. O estudo consiste em analisar o comportamento tanto das características do asfalto modificado com polímero quanto as propriedades físicas e mecânicas do CBUQ com esse novo ligante aditivado.

O comportamento do asfalto modificado será analisado através dos ensaios convencionais de caracterização como penetração, ponto de fulgor, viscosidade, além de

adesividade e recuperação elástica, sendo esta última considerada muito importante para a verificação do comportamento elástico do material modificado. A análise do comportamento da mistura (CBUQ), será através do ensaio Marshall por meio de suas propriedades de estabilidade e fluência, além das características de outros ensaios tais como resiliência e resistência a tração, que são considerados importantes para o método racional de dimensionamento de pavimentos.

Em resumo, o estudo segue uma diretriz comparativa, ou seja, busca avaliar e, sempre que possível, quantificar os efeitos causados no CAP pela adição do polímero do tipo elastômero termoplástico (SBS), além de análise do comportamento nos parâmetros Marshall para as misturas com dois tipos de ligantes em estudo. Verifica-se também o comportamento do agregado graúdo (calcário) nas propriedades físicas e mecânicas da mistura betuminosa.

CAPÍTULO – 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1) INTRODUÇÃO

Neste capítulo, procura-se de uma forma resumida apresentar conceitos relacionados a materiais betuminosos e polímeros ressaltando os objetivos direcionados a pesquisa proposta, relatando-se de maneira clara os componentes do concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), tendo como prioridade descrever mais detalhes relacionados às características e propriedades do asfalto polimerizado, entretanto com a preocupação de não ser omissos às informações necessárias dos agregados.

O estudo abordará aspectos de cada material, de modo a facilitar o entendimento e compreensão das suas características e propriedades, visando primordialmente verificar o comportamento físico e mecânico de misturas obtidas com asfaltos modificados com polímeros.

Ressalta-se a importância de relatos e dados já existentes a respeito do asfalto polimerizado utilizados nos CBUQ, colocando vantagens e desvantagens em relação ao tipo convencional. Neste aspecto os ensaios de laboratório e a observação do desempenho do comportamento em campo são fundamentais no estabelecimento de critérios de aceitabilidade para novas tecnologias no campo da engenharia.

2.2) MATERIAIS BETUMINOSOS

2.2.1) *Origem e conceitos*

Os materiais betuminosos são misturas de hidrocarbonetos solúveis em bissulfeto de carbono (CS_2) com propriedades de aglutinação, impermeabilização e versatilidade de utilização. São materiais considerados termoplásticos (comportamento variável com a temperatura) e tem comportamento tensão versus deformação dependente do tempo de aplicação de carga.

Existem duas categorias de materiais betuminosos que são os asfaltos e os alcatrões. Os asfaltos provenientes do petróleo e os alcatrões originados do carvão,

madeira etc. No Brasil praticamente não se utiliza os alcatrões. Nesta revisão será dado ênfase ao asfalto de petróleo.

O asfalto é um material aglutinante de consistência variável, cor pardo escuro ou negra, no qual o constituinte predominante é o betume. O betume é constituído pela combinação de hidrocarbonetos de cor, dureza e volatilidade variáveis, às vezes associados a matérias naturais. Quanto à obtenção do asfalto, pode-se obter na natureza em jazidas ou ser obtido da destilação (refinação) do petróleo.

A maior parte do asfalto empregado no mundo é produzido a partir do petróleo cru em refinarias através de vários processos. O petróleo cru não tem compostos insaturados de cadeia linear, que aparecem durante o refino, que se dá através de vários processos: destilação primária, destilação a vácuo, visco-redução, craqueamento térmico, craqueamento catalítico, reforma catalítica, hidro craqueamento, hidrogenação e tratamento dos derivados de petróleo

O refinamento do petróleo transforma-o em vários produtos derivados tais como: gás liquefeito, gasolina, solventes, querosene, óleos, asfalto, coque e resíduos. A quantidade de cada derivado depende das características do petróleo usado como matéria prima e das características de refino. O cimento asfáltico de petróleo (CAP) pode ser produzido de diversas maneiras em função do tipo de petróleo, conforme relata (LEITE, 1990).

Quimicamente, o asfalto é definido como sendo um sistema coloidal constituído por micelas de asfaltenos dispersados em meio intermicelar oleoso, formado pela mistura de óleos aromáticos saturados denominados de maltenos. A natureza, forma, quantidade das micelas, e as proporções relativas dos óleos aromáticos e saturados vão comandar as propriedades do CAP. Segundo PINTO (DNER-curso AM8, 1981), a estrutura dos asfaltenos governa o comportamento reológico do asfalto, enquanto a proporção da relação asfalteno/malteno governa a sensibilidade dos asfaltos às variações de temperatura.

O petróleo é a principal fonte de obtenção de CAP no mundo atual, e do qual se obtém por destilação, toda a gama de asfaltos, das mais variadas consistências e viscosidade. Estes asfaltos podem ser utilizados assim da forma como são obtidos ou

então transformados em líquido (asfalto diluído ou dissolvido) ou em emulsões (os asfaltos emulsionados).

O cimento asfáltico obtido por destilação é designado por CAP (cimento asfáltico de petróleo), e o natural identificado por CAN (cimento asfáltico natural). São materiais de consistência semi-sólido à temperatura ambiente, de modo que exigem aquecimento para ter a consistência apropriada para serem manipulados e aplicados, necessitam também de aquecimento dos agregados para o bom envolvimento. Possuem características de flexibilidade, durabilidade, aglutinação, impermeabilização e elevada resistência à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis.

Estes materiais entram na composição dos pavimentos, mais especificamente em revestimentos, com três funções básicas: coesão, impermeabilização e flexibilidade.

2.2.2) Caracterização do CAP

O CAP é caracterizado por um conjunto de ensaios físicos como: penetração, viscosidade, ponto de amolecimento e ductibilidade, além de índices baseados em análise química. Estes últimos baseiam-se na determinação da quantidade relativa de tipos de compostos presentes, porém não será tratado neste estudo, embora saiba-se da importância da análise química para compreensão da compatibilidade entre CAP e polímero.

2.2.3) Classificação do CAP

Oficialmente, no Brasil, os cimentos asfálticos são classificados pela sua consistência ou grau de dureza. De acordo com as especificações brasileiras IBP/ABNT-EB-78 e regulamento técnico DNC 01/92 e revisão 2, os cimentos asfálticos são classificados por viscosidade e por penetração (Tabela 2.1). De acordo com a penetração (a 25^o C) os CAPs se enquadram em quatro categorias: CAPs 30/45; 50/60; 85/100; 150/200, sendo este último indicado somente para as regiões frias pois possui baixa consistência. Já quanto à viscosidade (à 60^o C), os CAPs são classificados em três grupos: CAP-7, CAP-20, CAP-40, em ordem crescente de viscosidade.

Tabela 2.1: Classificação Brasileira de CAPs

Por Penetração	150/200	85/100	50/60	30/45
Por Viscosidade	CAP - 7		CAP - 20	CAP - 40

→ Maior Dureza → Maior Viscosidade

SANTANA (1993), comenta que não existe nenhuma correlação definida entre as duas classificações. Veja o exemplo real mostrado na Tabela 2.2, onde tem-se dois CAPs 50/60 obtidos em duas refinarias distintas:

Tabela 2.2: Análise de Consistência: Penetração/Viscosidade (SANTANA, 1993)

ENSAIOS	REDUC	RPBC (Cubatão)
Penetração (0,1mm)	60 (CAP 50/60)	52 (CAP-50/60)
Viscosidade (Poise)	2.000 (CAP -20)	4.000 (CAP - 55) ¹

A escolha da consistência do CAP deve ser de acordo com o tipo de serviço e o clima da região. O uso de um cimento asfáltico muito consistente, ou seja duro para o clima da região, pode produzir pavimento quebradiço e conseqüentemente pouco durável (MARTIM & WALLACE, 1958).

O ensaio de penetração isoladamente não caracteriza perfeitamente a qualidade da CAP, contudo, dá uma indicação do seu grau de dureza, servindo em algumas especificações como parâmetro de classificação principalmente para caracterizar o comportamento do material betuminoso recuperado de um pavimento existente (DNER, 1994).

Em seminário realizado em 1984 na cidade de Fortaleza/CE, promovido pela PETROBRÁS, com o objetivo de definir número ideal de tipo de CAP necessário à pavimentação no Brasil, concluiu-se que os CAPs 30/45 e 50/60 são suficientes para atender às necessidades brasileiras e complementado pelo CAP 85/100 para as áreas de temperaturas muito baixas, conforme relata SANTANA & GONTIJO (1984). Foi enfatizado também a necessidade de se classificar os CAPs por viscosidade e não por penetração, o que passou ser feito a partir de 1984.

¹ CAP 55 – classificação por viscosidade (resolução do CNP Nº 21/86), porém 1992 este limite é substituído para um outro limite, CAP 40, conforme apresenta Apêndice C.

As especificações americanas ASTM (American Society for Testing Materials) classificam o cimento asfáltico pelo ensaio de penetração a 25° C e viscosidade a 60° C, assim como as brasileiras. Contudo estas não garantem qualidade adequada ao uso, necessitando de requisitos relacionados ao desempenho em serviço.

Portanto, pensando nisso, realizou-se nos EUA de 1987 a 1993 uma pesquisa com cimentos asfálticos, SHRP (Strategic Highway Research Program), com o propósito de modernizar os ensaios para especificação de ligantes e com isso evitar problemas precoces de deformações permanentes, trincas por fadiga, fissuras a baixas temperaturas e envelhecimento em pavimentos flexíveis. Nesta pesquisa, as especificações se classificam não por consistência (penetração ou viscosidade), mas por temperaturas máxima, intermediária e mínima a que o pavimento é submetido em serviço, e para as quais os ligantes devem atender determinados requisitos medidos por ensaios reológicos.

TONIAL & LEITE (1994) analisando a possibilidade de adaptar as especificações SHRP às condições climáticas brasileiras, mostram preliminarmente que os CAPs estudados de amostras produzidas no Brasil atualmente passam nas especificações SHRP e portanto devem comportar-se bem como ligantes rodoviários. No entanto, pelos dados meteorológicos disponíveis, verificaram os autores citados a necessidade de produção de asfaltos mais resistentes em algumas regiões do Brasil, para assegurar maior resistência à formação de trilha de roda. SOARES et alii (1998) apresentou um estudo comparativo de CAP 50/60 e um de maior consistência, CAP 30/45. Com a proposta de utilização do CAP 30/45, para a região do Ceará e classificado segundo as especificações superpave do SHRP em PG 70-22.

No Brasil, os afundamento em trilhas de rodas não constitui um problema considerável quando se analisa as rodovias federais, onde os defeitos mais encontrados são os trincamentos ocasionados por fadiga. Já na pavimentação urbana deve-se levar em consideração os afundamentos principalmente nos corredores de ônibus.

As especificações SHRP, empregam ensaios reológicos que permitem medir características mais adequadas dos ligantes e que se relacionam às propriedades mecânicas de misturas betuminosas e também com o desempenho em pavimentos. A temperatura máxima, é considerada a temperatura correspondente a 2cm abaixo da

superfície, média dos 7 (sete) dias mais quente do ano, enquanto a mínima é a mínima temperatura da superfície durante o ano.

Para TONIAL & LEITE (1994), existe uma tendência mundial para adoção destas especificações nos países desenvolvidos, desde que se efetue uma adaptação às condições climáticas de cada país.

2.2.4) Propriedades do CAP

As principais propriedades do cimento asfáltico de petróleo (CAP), empregados em pavimentação, são as seguintes (SANTANA & GONTIJO, 1984):

Constituição Química do Asfalto: O asfalto têm uma estrutura complexa e de difícil determinação, sendo suas propriedades dependentes da natureza de petróleo de origem e do processo de sua obtenção (refino).

O asfalto é definido numa grosseira simplificação, como sendo um sistema coloidal constituído por micelas (partículas) de asfaltenos (que são compostos altamente polares e de alto peso molecular) e protegidas por resinas “pepetizantes”, dispersados em um meio intermicelar oleoso, formado pela mistura de óleos aromáticos e saturados, denominado maltenos.

Se o sistema tem tendência a formar micelas livres, mais soltas conseqüentemente mais susceptível à temperaturas tem-se um sistema coloidal do tipo sol (asfaltenos bem dispersos nos óleos maltenos). No caso das micelas começarem a se juntar formando cadeias serão menos susceptível à temperatura, tem-se um sistema gel.

Em altíssimas temperaturas tem-se um sistema sol, o CAP se comporta como um líquido Newtoniano. Em baixíssimas temperaturas tem-se um sistema gel e o CAP se comporta como um sólido elástico e quebradiço. Enquanto no sistema sol-gel tem uma componente viscosa (newtoniana) e uma componente elástica (hookeana), sendo contudo o sistema mais adequado às condições climáticas brasileiras.

Propriedades Reológicas do CAP: São as que governam o comportamento dos CAPs submetidos a tensões provenientes do tráfego, e de origem térmica (dilatações e retrações). As principais variáveis reológicas são: as tensões, as deformações, os tempos de carga e as temperaturas. O tipo de tensão mais importante num CAP em serviço no pavimento, é a tensão de tração.

As especificações do DNER e ASTM classificam os CAPs em função da penetração (25^oC) ou da viscosidade absoluta (60^oC). A viscosidade absoluta (poise) é um índice de caráter científico, enquanto a penetração (0,1mm) embora sendo um índice empírico, tem grande importância reológica além de outros como: ponto de amolecimento (^oC), índice de suscetibilidade térmica (IST - combinação de penetração com o ponto de amolecimento) e ductibilidade (cm).

Convém lembrar, que devido às diferentes metodologias utilizadas para análise da composição química, os resultados obtidos podem apresentar diversidades. BRULÉ (1986) considera que a reologia e a composição química se interrelacionam, quando se compreende a estrutura do CAP. Estando sistemas coloidais em equilíbrio, alterações podem ser introduzidas pela variação de temperatura, conduzindo a uma modificação do comportamento visco-elástico.

Durabilidade: É a propriedade que os CAPs, têm de resistir mais, ou menos, à mudança em seu comportamento durante à estocagem, aplicação na obra e em serviço no pavimento. Após sua produção, o CAP sofre a primeira alteração de estrutura molecular, durante as operações de usinagem e depois em presença de ar e da água da chuva ao longo do tempo.

Além disso, as propriedades do CAP variam enormemente com a variação da temperatura. Por esta razão, a sua suscetibilidade térmica é de máxima importância. O ensaio de película delgada (MB 425-1970) informa sobre o envelhecimento do CAP durante a mistura.

Durante o aquecimento, e principalmente em mistura na usina quando uma película delgada do CAP vai recobrir um agregado muito aquecido, o CAP perde óleos voláteis de sua composição e incorpora moléculas de oxigênio, o que se traduz imediatamente em um aumento de sua consistência original. Já durante seu serviço no pavimento, o CAP continua (agora lentamente) a perder elementos voláteis, e a incorporar oxigênio do ar, funcionando a luz solar como um catalisador (daí a vantagem de uma mistura densa, com pequena porcentagem de vazios).

Segundo o DNER (1994), os principais fatores que contribuem para o endurecimento do material betuminoso com o tempo são: oxidação, volatilização e polimerização. A oxidação é a reação do oxigênio do ar com o ligante. A volatilização é

a evaporação dos constituintes voláteis em função da temperatura. A polimerização é o resultado de reações internas promovendo a formação de uma grande molécula.

O efeito do envelhecimento dos asfaltos produzido pela oxidação modifica sua estrutura química. Num pavimento a oxidação do asfalto ocorre da superfície para o interior, sendo que com o aparecimento de fissuras e trincas o processo se desenvolve mais rapidamente pela facilidade do ar atingir o interior do revestimento. Esta ação termo-oxidativa é responsável pela perda de aglutinante, provocando seu endurecimento e tornando a estrutura do revestimento menos flexível, conseqüentemente menos apropriado para acompanhar as deformações de base, surgindo daí fissuras decorrentes das cargas oriundas do tráfego.

Adesividade e outras propriedades não reológicas: A adesividade é a maior ou menor resistência que um CAP que cobre um agregado oferece ao seu deslocamento pela ação da água. É pois uma propriedade do par asfalto/agregado e não propriamente do CAP (porém será vista com mais detalhes no tópico de asfalto polimerizado). Por outras propriedades não reológicas entende-se: composição físico-química, ponto de fulgor e densidade.

2.2.5) Comportamento da mistura asfáltica numa estrutura de pavimento

A camada superior do revestimento é a que recebe aplicações direta da carga, logo é a mais solicitada, além de sobre ela ser exercido considerável cisalhamento, o que deve ser resistido em sua maior parte pela coesão da mistura asfáltica. Além do que, sendo o revestimento uma camada muito solicitada, necessita que sua estrutura física seja adequadamente concebida com um ligante que possua adequadas propriedades mecânicas, elásticas e de durabilidade.

As propriedades individuais dos componentes do CBUQ têm grande importância, entretanto o comportamento da mistura asfáltica é melhor explicado considerando que o ligante e o agregado mineral atuam como um sistema.

Conforme relata MOTTA et alli (1996) a forma de entender o comportamento da mistura é considerar o tipo primário de defeitos que os técnicos tentam evitar que são: deformação permanente, trinca por fadiga e trinca a baixa temperatura.

A *deformação permanente* é representada por uma acumulação de pequenas parcelas de deformação que ocorre em cada carregamento de caráter irreversível. Esta deformação não pode ser recuperada, e ocorre nos primeiros anos de vida do pavimento. O afundamento de trilha de roda é a forma mais comum de deformação permanente no pavimento, que por sua vez pode ter diversas causas, sendo duas consideradas as principais. Uma delas, o afundamento de trilha de roda é causada pela repetição de tensões aplicadas no subleito, sub-base ou base, com contribuição relativa destas camadas para a deformação permanente total. A outra causa importante no afundamento de trilha de roda resulta da acumulação de deformação nas camadas betuminosas, onde este tipo de afundamento é causado por misturas que possuem pequena resistência ao cisalhamento, não resistindo às cargas repetidas que estão sujeitas, e portanto, um fenômeno característico de altas temperaturas.

A equação de Mohr-Coulomb ($\tau = c + \sigma \cdot \text{tg}\phi$) que representa a resistência ao cisalhamento da mistura, pode ser utilizada para ilustrar como tanto o materiais minerais como o ligante afetam o afundamento. Sendo τ é a resistência ao cisalhamento da mistura, o termo c é a coesão e considerada a contribuição global do cimento asfáltico sobre a resistência ao cisalhamento da mistura, sendo ideal para aumento da resistência ao cisalhamento o uso de asfalto mais duro (mais viscoso) e que se comporte como um sólido elástico a altas temperaturas do pavimento. Outra maneira de aumentar a resistência ao cisalhamento de uma mistura é o uso de agregados que possua alto valor de ângulo de atrito interno ($\text{tg}\phi$), ou seja, obtendo agregados britados (cúbicos com arestas vivas e textura rugosa) e com grande resistência ao desgaste.

O *trincamento por fadiga* é um é um problema que ocorre pela repetição da aplicação de cargas pesadas, isto é, é despertada uma tensão de tração na flexão, que após um número de repetições N^1 , provoca o trincamento por fadiga. É um problema progressivo, que em alguns casos o estágio final do processo de fadiga é a deterioração do pavimento com a formação de painelas². A trinca por fadiga é causada por vários fatores que ocorre simultaneamente, e sempre com a repetição de carga presente.

¹ N – número de repetições de um eixo simples padrão

² Painelas – são cavidades de tamanhos variados no revestimento do pavimento, formada pela remoção de vários pedaços do revestimento por ação do tráfego.

Conforme relata MOTTA et alli (1993) alguns engenheiros crêm que problemas de drenagem do subleito, resultam em um pavimento muito deformável, de alta deflexão, sendo esta a principal causa da trinca por fadiga.

Segundo DOMINGUES (1993) o trincamento por fadiga é um conjunto de trincas , causadas por diminuição gradual da resistência da superfície do revestimento asfáltico, sob repetida ação das cargas de tráfego e, pausado por: colapso do revestimento asfáltico devido à repetida ação das cargas do tráfego, sub-dimensionamento ou má qualidade da estrutura ou de uma das camadas do pavimento, solo com baixa capacidade de suporte, envelhecimento (fim de vida do pavimento) e asfalto duro e quebradiço.

Camadas de pavimento mau projetadas e/ou executadas estão propensas a altas deflexões quando solicitadas, contribuindo assim para o trincamento por fadiga. Dessa forma, as camadas finas e muito rígidas de pavimento, sujeitas a altas deflexões quando solicitadas repetidamente por carregamento pesado, são mais susceptíveis a fadiga.

Trincas a baixa temperatura é um problema que ocorre mais por condições ambientais adversas do que pela ação do tráfego. Ocorrem quando uma camada betuminosa se contrai em clima frio. Ou seja quando o pavimento se contrai, surgem tensões de tração ao longo da camada, e em algum ponto ao longo do pavimento estas excede a resistência à tração e, portanto, a camada asfáltica se rompe, cujos os efeitos vão se acumulando a cada ciclo de frio. Em geral, asfaltos duros são mais propensos a trincarem a baixas temperaturas do que asfaltos moles (MOTTA et alli, 1996).

2.3) POLÍMEROS

2.3.1) Introdução

Dentre os diversos elementos estruturais (madeira, pedra, aço, vidro, cerâmica, etc.) empregado pelo homem ao longo de sua evolução, destacam-se agora os polímeros como materiais empregados na tecnologia da construção. Os polímeros são produtos orgânicos macromoleculares que têm, como característica de sua estrutura, a presença de um enorme número de uma mesma pequena molécula chamada de “monômero”, sendo todas unidas de forma sequenciada. O número de monômeros numa molécula polimérica é bastante variável.

Os polímeros podem ser obtidos tanto na natureza (madeira, cortiça, lã, couro e outros) e neste caso são chamados de polímeros naturais, quanto podem ser obtidos artificialmente como produto de síntese, ou seja pela união sequenciada de pequenas moléculas (monômeros) e, neste caso conhecidos como os polímeros sintéticos (poliestireno e outros). Em outras palavras, polímeros podem ser considerados moléculas relativamente grandes, em cuja estrutura se encontram repetidas as unidades químicas conhecidas como “meros”- unidade química repetida ou resíduo de monômero.

Para SILVA et alii (1996), monômero é uma molécula orgânica a qual é capaz de combinar-se quimicamente com outras moléculas, similares ou não, para formar um material de elevado peso molecular conhecido como polímero (ou resina sintética). Para MANO (1985), polímeros representa compostos de elevado peso molecular em que a complexibilidade das moléculas (e não a repetição de simples unidades) é que acarretam o seu tamanho, sendo englobados no termo amplo e geral de macromoléculas.

Sabe-se que os polímeros são compostos formados pela polimerização (reações), e podem ser divididos em dois grupos, que são os homopolímeros (mesmo tipo de mero) e os copolímeros (com mais de um tipo de mero).

Neste trabalho o polímero utilizado é um copolímero composto pelo estireno butadieno estireno (SBS), produzido exclusivamente para fins rodoviários.

2.3.2) Polímeros e polimerização

Por reações de polimerização entendem-se aquelas em que produtos simples(monômeros) reagem entre si, combinando suas moléculas e formando moléculas maiores, caracterizada pela repetição de uma unidade básica (mero).

Segundo BLASS (1988), o número de vezes que se repete a unidade básica na molécula do polímero, representa o grau de polimerização. Normalmente, maiores graus de polimerização asseguram melhores propriedades físicas.

Quanto ao método de preparação os polímeros podem ser classificados em dois tipos: polímeros de adição e de condensação. Nos de adição ocorre uma reação no qual uma mesma unidade monomérica é acrescentada à cadeia em crescimento, sem formação de subproduto. Ou seja, quando um monômero não saturado, sob condições definidas de temperatura e pressão e em presença de um catalisador adequado,

polimeriza pela ruptura de alguma ligação dupla, gerando meros que se intercadeiam, sem liberar qualquer produto secundário (BLASS, 1988).

Na reação de condensação, o polímero resulta da reação consecutiva de moléculas de mais de um tipo com eliminação sucessiva de moléculas pequenas denominadas de produtos secundários ou subprodutos (H_2O , H_2 , NH_3 , etc.), sob condições definidas de temperatura e pressão, e em presença de um catalisador adequado.

Os polímeros podem apresentar moléculas sem ramificações (conhecidos como polímeros lineares) ou com ramificações. Ainda é possível que estas ramificações estejam apenas em uma cadeia linear básica, ou que promovem a interligação entre diferentes cadeias lineares, formando reticulados tridimensionais (espaciais) ou ligações cruzadas. Essas diferentes configurações moleculares afetam certas propriedades do polímero, em especial a fusibilidade e solubilidade.

2.3.3) Classificação dos polímeros (quanto a fusibilidade)

Uma classificação de polímeros que é bastante útil para o estudo dos CAPs-Polímeros, é a de Disnem apud SANTANA & SALATHÉ (1990). Nesta os polímeros podem ser divididos, segundo suas características tecnológicas em quatro categorias:

Termorrígidos: são aqueles que depois de formados, sua estrutura espacial lhes confere um caráter de rigidez, e não amolecem mais sob ação de elevação de temperatura. Ou seja, a reação ocorre por meio de um agente de cura ou de um catalizador, e uma vez ocorrida a cura, o material endurece e não pode ser mais ser remoldado. Por exemplo resina EPOXI, etc;

Termoplásticos: são aqueles que quando da ação do calor amolecem de forma reversível, isto é, amolecem quando aquecidos e endurecem quando resfriados. Por exemplo: EVA, etc.;

Elastômeros: são aqueles que quando aquecidos se decompõem antes de amolecer, e apresenta propriedades elásticas que lembram a borracha. Por exemplo o SBR etc.;

Elastômero –Termoplásticos: são aqueles que ao serem aquecidos se comportam como termoplásticos, mas em menores temperaturas apresentam propriedades elásticas. Por exemplo: SBS, etc.

Os polímeros do tipo linear são sensíveis à ação da temperatura, isto é amolecem quando aquecidos e endurecem quando resfriados, por isso são chamados termo-sensíveis, uma vez que as forças de ligação intermoleculares são fracas (Van Der Waals) e podem ser facilmente superadas pela elevação da temperatura, permitindo que a deformação plástica se dê pelo escorregamento das moléculas em relação as outras (MARTINHO et alii, 1995).

Já os do tipo tridimensional ou espacial (ramificações cruzadas) não adquirem movimento plástico com o aumento da temperatura e por isso são termo-insensíveis e são chamados de termofixo ou termorrígidos.

Para Disnem apud MARTINHO et alii (1995), o efeito da adição de polímeros das categorias de termoplásticos e elastômeros ao asfalto, é muito mais de um aumento da viscosidade do que uma melhoria nas propriedades elásticas.

Existem um grupo de polímeros termoplásticos que, devido à forma enovelada de sua cadeia, possui a propriedade adicional de poder sofrer enormes deformações em caráter absolutamente reversível. Esta característica advém de forma “em mola” da parte de sua estrutura. Esses polímeros são chamados de elastômero-termoplásticos, pois têm a vantagem de se comportar como um termoplástico nas temperaturas elevadas e como borracha vulcanizada à temperatura ambiente.

2.3.4) Polímeros ‘SBS’ (denominação inglês styrene-butadiene-styrene)

Segundo MARTINHO (1993) os elastômeros sintéticos de melhor desempenho com os ligantes asfálticos são os copolímeros termoplásticos de butadieno e estireno (SBS). As características estruturais desses polímeros, conferem aos elastômeros elevadas propriedades dinâmicas tais como: alta resiliência, baixo desenvolvimento de calor e alta resistência ao fendilhamento por flexão, bem como elevada resistência a abrasão e baixas deformações permanentes à tração e à compressão.

Os polímeros SBS são os típicos representantes dos chamados elastômeros, que além das propriedades termoplásticas, apresentam a propriedade adicional de poderem sofrer enormes deformações elásticas, ou seja, deformações reversíveis. Na realidade, estas características advém da forma “em mola” de sua seqüência butadiênica, onde as

extremidades estirênicas fazem o conjunto funcionar como um “halteres”, conforme ilustra Figura 2.1 (SALATHÉ et alii, 1990).

A capacidade de enormes deformações com caráter elástico, que permite que o sistema envolvido entre sua rede (como CAP) seja arrastado nas duas direções, é que lhe permite transformar um produto com características predominantemente visco-plásticas como o CAP, num sistema com características elásticas e com enormes deformações de caráter absolutamente reversível (MARTINHO, 1993).

COPERBO¹ - Companhia Pernambucana de Borracha Sintética (hoje Petroflex). É uma das empresa fabricante dos polímeros SBS no Brasil e, fornecedora do SBS para a presente pesquisa. O processo utilizado na Petroflex é de polimerização em solução, com catalisador estéreo-específico, originando elastômeros com peso molecular médio elevado, cadeia altamente lineares e microestrutura controlada.

Os principais tipos de elastômeros atualmente produzidos e comercializado por esta empresa, todos sob a marca COPERFLEX e, os mais destacados para o uso rodoviário são os de referência TR-2040 e TR-2032.

2.4) ASFALTO POLIMERIZADO

2.4.1) Introdução

Asfalto modificado com polímero (AMP) é o asfalto resultante da interação física ou química de polímeros com ligante asfáltico, com a finalidade de dotar o material resultante de propriedades visco-elásticas adequadas ao fim a que se destina.

Determinados polímeros modificam para melhor as características dos CAPs alterando o comportamento de algumas propriedades do ligante. Há cerca de trinta anos foi verificado que a adição de polímeros ao asfalto melhora consideravelmente suas propriedades, especialmente a resistência à fratura a baixas temperaturas e ao escoamento sob condições de aquecimento elevado (MARTINHO et alii, 1995). A evolução das pesquisas permitiu aprofundar os conhecimentos e obter informações mais precisas sobre o mecanismo de atuação dos polímeros como agente melhorador das propriedades dos materiais betuminosos.

¹ Em setembro de 1996, a COPERBO passou a pertencer a Empresa PETROFLEX Indústria e Comércio S.A.

Para melhorar o desempenho dos CAPs, pode-se utilizar artifícios como: a adição de dopes para aumentar a adesividade com os agregados, usar o teor e a natureza do filer das misturas asfálticas para espessar o ligante (maior estabilidade da mistura) e melhorar a adesividade com os agregados (filer calcário). Entretanto, não se costuma chamar de asfaltos modificados os sistemas filer-asfalto e dope-asfalto, reservando-se essa denominação quando os aditivos usados são polímeros de alto peso molecular que criem na estrutura do CAP uma efetiva rede elástica. Tem-se então os chamados asfaltos modificados com polímero ou simplesmente asfaltos modificados, com melhorias numa gama razoavelmente extensa das características dos CAPs com reflexos positivos (SANTANA & SALATHÉ, 1990).

Conforme anteriormente definido, o asfalto é um sistema constituído por micelas (asfaltenos) dispersas em sistema coloidal (maltenos). Percebe-se portanto que quando o pavimento sob ação do tráfego ou seja, solicitado, vai haver um deslocamento das micelas nas duas direções (tração-compressão). Entretanto, no retorno, nem sempre as micelas voltam ao ponto original, ocasionando um deslocamento micelar residual (permanente)

O sucessivo acúmulo desse deslocamento micelar, leva à diminuição da capacidade de ir e vir das micelas, por estrangulamento das seções transversais da película do ligante, o que diminui muito a aleatoriedade da reorganização, responsável pela capacidade de fluxo plástico do ligante ao longo do tempo. Com um certo número de aplicações de cargas, gera-se a ruptura da seção transversal do ligante naquele ponto, ocasionando o aparecimento de fissuras que anuncia o final da vida útil do revestimento.

Então a filosofia básica da modificação de um ligante é exatamente o aumento da probabilidade do retorno dessas micelas à sua posição original, nesse jogo de vai e vem a que são submetidas ao longo da vida útil do pavimento, pela ação das cargas do tráfego. Aumentando-se essa probabilidade de retorno das micelas à posição original, eleva-se o número de repetições de carga necessária à ruptura do ligante, o que equivale a ampliar sua vida útil.

Para MARTINHO et alii (1995) Isto só se torna possível se o asfalto for modificado por um sistema que, distribuído em todo o volume do ligante, possa provê-lo de um sistema de “molas” entrelaçadas, em cujo interior fique o CAP.

Com estas condições, quando o ligante modificado trabalha no pavimento, o CAP se comporta exatamente da mesma maneira como se estivesse puro. Entretanto, como está envolvido por uma rede de “molas” conforme Figura 2.1, estas ao se esticarem oferecem maior resistência à deformação. Cessada a ação da carga, o retorno das micelas à sua posição original é completamente favorecido pelo re-enovelamento das “molas”. É necessário que estas molas tenham grupos volumosos em suas extremidades para que sejam inter-amarradas, o que altera significativamente as propriedades mecânicas e reológicas do sistema em relação às do CAP puro.

Para melhorar as propriedades mecânicas, elásticas, bem como a estabilização do sistema asfalto-polímero, reações internas poderão ser conduzidas através de agentes reticulantes.

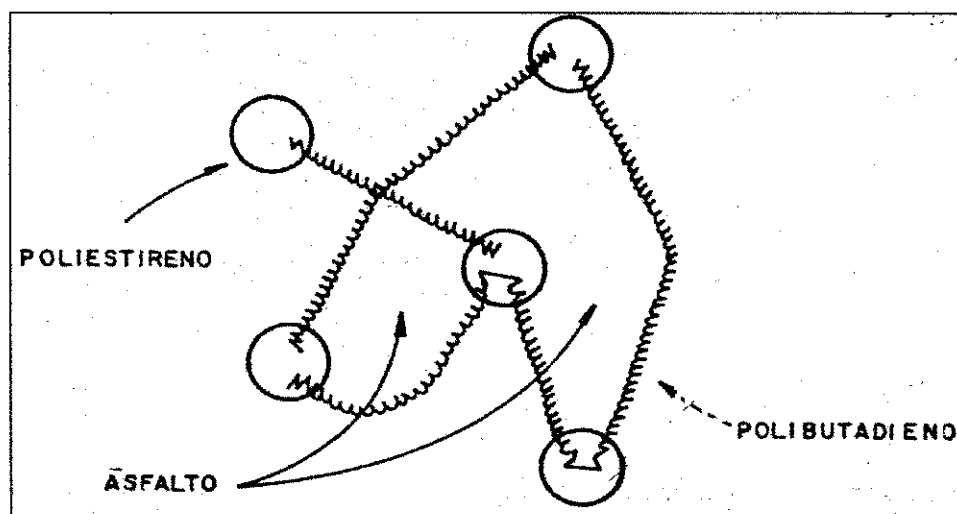


Figura 2.1: Morfologia de co-polímero “SBS” (SALATHÉ, et alii, 1990)

2.4.2) Histórico no mundo e no Brasil

Nos países do chamado primeiro mundo há uma preocupação efetiva com a melhoria da qualidade do piso rodoviário e com o aumento da vida útil das estradas. Segundo MARTINHO et alii (1995), há mais de 180 anos pesquisadores vêm investigando as melhorias nas propriedades elásticas e mecânicas dos materiais betuminosos, decorrentes de ação de macromoléculas adicionadas a estes materiais.

Até 1943 são listadas cerca de 116 referências à patentes requeridas e artigos técnicos de misturas asfalto-elastoméricos. O maior uso destas misturas têm sido em

pavimentação rodoviária, juntas selantes, impermeabilizações, pintura industrial e argamassa masticue (FARAH & SANTOS, 1987).

Em termos de pavimentação, tem-se muito citado o trecho rodoviário construído em 1936 na Holanda (Amsterdã) com o emprego de CAP elastômero, em que suportou todo o pesado tráfego da invasão alemã e sua posterior retirada (II guerra mundial, 1939/1945). Após a guerra, técnicos rodoviários visitaram o trecho e ficaram impressionados com o desempenho da mesma, tanto assim que foram recomendados pavimentações semelhantes nos Estados Unidos e Europa (FARAH & SANTOS, 1987).

As chamadas duas crises de petróleo (1973 e 1979) provocaram nos países desenvolvidos a utilização de petróleos não tradicionais para a produção de CAPs de piores características, com grandes queixas dos usuários. Houve, então, um recrudescimento nas pesquisas sobre CAPs-polímeros nas décadas de 70 e 80 (SANTANA & SALATHÉ, 1990), e também tendo continuação na década de 90.

Os estudos de asfalto-polímeros que se encontram hoje mais avançados, são encontrados em países da Europa e Estados Unidos. Este último concluiu um projeto conhecido como SHRP (Strategic Highway Research Program), com duração de cinco anos, em que foram gastos cerca de 150 milhões dólares para aprofundar estudos sobre ligante, mistura betuminosa, projeto de dimensionamento, manutenção e preparo de revestimentos de rodovias e sua avaliação (LEITE et alii, 1995).

A Europa e os Estados Unidos intensificaram seu desenvolvimento no campo do asfalto-polímero nos últimos trinta anos, com o objetivo de melhorar a qualidade de ligante asfáltico, tornando-o mais resistente à ação de cargas e ao intemperismo.

Na Europa, principalmente França e Espanha, o emprego dessa tecnologia vem crescendo rapidamente, calcado em especificações e metodologias técnicas de aplicação. Várias empresas desenvolveram formulações comerciais, destacando-se a ELF, JEAN LEFEVRE, COLAS, PROBISA e SCREG; um desses CAP-Polímeros protegidos por patentes e conhecido no Brasil é o Stirel Francês também usando polímero do tipo SBS (MARTINHO et alii, 1995). A utilização desses ligantes polimerizados vem substituindo para determinadas aplicações, com superioridade, os ligantes convencionais nos serviços de tratamento superficial, lama asfáltica, pintura de ligação, usinado à quente e camada drenante.

No Brasil as primeiras experiências foram desenvolvidas na Bahia, em 1968 pelo engenheiro VOGH, com adição de látex SBR, manualmente no misturador de usinas gravimétricas, para a fabricação do concreto asfáltico usinado à quente. Em 1969, VOGH e FARAH executaram trechos experimentais, com a ajuda da empresa Tercon, nas ruas internas da Empresa Petroflex, utilizando látex catiônico em mistura à quente (MARTINHO et alii, 1995). O Apêndice “A” mostra a relação dos trechos executados com asfaltos polímeros no Brasil.

Novos trechos com látex foram realizados em ruas do município de Belford Roxo, Rio de Janeiro, no ano de 1976, contando com a participação da Petroflex, Cenpes, Koteca e do engenheiro FARAH. No decorrer da década de 70 grande ênfase foi dada às misturas empregando polímero termo-rígido como a resina epoxi. Neste período foi construída a ponte Rio-Nitéroi, e devido as peculiaridades da estrutura dessa ponte, foi indicado para revestimento do tabuleiro de aço do vão central misturas asfálticas com resina Epóxi (MARTINHO et alii, 1995).

No ano de 1982, a empresa Petroflex iniciou o processo industrial de inversão de látex aniônico S-62, em catiônico, possibilitando então, a mistura com emulsões asfálticas catiônicas. A partir desse desenvolvimento foi crescente o emprego de látex catiônico conjugado com as emulsões asfálticas em serviços do tipo tratamento superficial, lama asfáltica e pintura de ligação.

Um dos destaques da utilização do asfalto polimerizado, aconteceu no ano de 1982, com o rejuvenescimento da superfície do revestimento do vão central da ponte Rio-Niterói, com o emprego da lama asfáltica modificada com látex de SBR catiônico. Também durante os anos de 1983 e 1984 foram realizadas algumas experiências, empregando o látex de SBR na produção de usinado a quente nos trechos: km 15 da rodovia Federal Rio-Petrópolis, rodovia estadual RJ-104 e o recapeamento externo da praia de Copacabana.

A técnica do asfalto modificado com elastômero termoplástico (SBS) é, relativamente recente em nosso país. O principal marco dessa tecnologia ocorreu em 1988, quando o Instituto de Pesquisa Rodoviárias do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, IPR/DNER, iniciou um plano de estudo no campo dos asfaltos modificados com polímeros, onde ficou confirmado a elevada performance de certos

tipos de polímeros, quando misturados com asfalto, em escala de laboratório. Promoveu-se então um confronto de ordem prática, onde estavam presentes, ação das cargas e do intemperismo. A realização desse trecho experimental ocorreu em 1990, na rua Leopoldo Bulhões no município do Rio de Janeiro que apresentava altas deflexões e elevado trincamento. Para a comparação do desempenho do asfalto polímero, foram realizados trechos subjacentes com a mesma condição estrutural na espessura de 5cm de CBUQ convencional e com 3cm de CBUQ (misturas densas e abertas) com ligante modificado com polímero SBS e EVA. O resultado observado no comportamento das misturas densas desses trechos, após dois anos de serviço, foi que o segmento executado com ligante convencional e o com ligante modificado com EVA apresentou um total trincamento. Já quanto ao trecho executado com o CAP SBS, após 3 anos e meio, o estado do revestimento permanecia perfeito, não sendo observado nenhuma fissura ou trinca na sua superfície (MARTINHO, 1993). Fato também observado por MACÊDO et alii (1995) onde relata que após 5 anos o revestimento com CAP SBS permanecia em estado perfeito.

A empresa Ipiranga Asfalto, tem-se destacado na pesquisa de asfalto polimerizado, e em 1992 realizou um trecho experimental na rodovia dos Bandeirantes em São Paulo, empregando o polímero SBS como modificador do asfalto. Outro trecho também foi realizado no ano de 1993 na rodovia dos Bandeirantes e em corredores de ônibus do estado do Paraná (MARTINHO et alii, 1995)

Uma outra empresa que também têm se dedicado e destacado nesta pesquisa de asfalto polimerizado, é a Petroflex, sendo a fabricante e fornecedora do polímero tipo SBS aqui no Brasil além do importado da SHELL. A COPERBO construiu, em 1993, no seu parque industrial uma unidade de modificação de asfalto, onde realizou vários trechos experimentais no estado do Pernambuco em parceria com o DER/PE (Fotos de trechos experimentais Apêndice “B”). Entre os diversos trechos selecionados, foi executado o da rodovia PE-75, localizado entre os municípios de Itambé e Goiana.

A Petrobrás por ser detentora do monopólio de produção de asfaltos, não poderia ficar alheia à evolução tecnológica nesse assunto, sob pena de perda de competitividade de sua subsidiária, a BR Distribuidora. Neste contexto, seu centro de pesquisas

(CENPES) conduz um projeto de pesquisa para desenvolvimento de tecnologia de produção de ligantes betuminosos em misturas com polímeros (LEITE et alii, 1995).

O Brasil entrou na era da privatização das rodovias, e dessa forma implantando concessão para algumas rodovias. A ponte Rio-Niterói, foi a primeira a entrar neste programa governamental de concessão no ano de 1995 e, inicialmente as firmas foram obrigadas a apresentar um projeto técnico para recuperação e manutenção da ponte. Todos os projetos apresentados como solução para o revestimento do vão central, foram basicamente com asfalto polimerizado e, sendo os mais destacados, os polímeros do tipo SBS, EVA e EPOXI. Entretanto a atual administração testa também a possibilidade de utilização de revestimento em concreto de cimento Portland.

2.4.3) Compatibilidade

Segundo MARTINHO et alii (1995), existe uma relação complexa entre a composição química do CAP, sua estrutura coloidal e suas propriedades físicas e reológicas. Toda ação cujo efeito seja a modificação química de um asfalto conduz, inevitavelmente, à modificação de sua estrutura e, por conseguinte de suas propriedades.

Nem todos os polímeros podem ser adicionados ao CAP. Existe o problema de compatibilidade entre o asfalto e o polímero, além do problema de estabilização da mistura, tendo em vista a diferença de densidade entre os produtos, o que faz com que estes tendam a se separar.

A alerta associada ao fenômeno de modificação de asfalto com polímeros, é de que não pode ser feita de forma genérica. Cada caso apresenta um comportamento ou fenômeno físico-químico diferente. Deve-se levar em consideração alguns fatores como tipo de polímero, adição de agentes compatibilizantes, maneira de adição do polímero e o estado físico, como também as interações entre certos componentes de asfalto com determinados tipos de polímeros. São fatores que merecem estudos à parte e que promovem modificações no ligante, às vezes de grande importância técnica. Todos esses aspectos têm parcela de contribuição no resultado da compatibilidade dos constituintes da mistura (SALATHÉ et alii, 1990)

É importante salientar que a compatibilidade refere-se ao sistema polímero-asfalto. Um polímero pode ser incompatível com a maioria dos asfaltos, mas compatível

com um asfalto específico. Aditivos químicos e reações são muito efetivos na compatibilização de misturas asfalto-polímeros conferindo uma desejável microestrutura e portanto melhorando sua estabilidade durante a estocagem e envelhecimento.

Para MARTINHO (1993), o polímero que confere ao CAP melhores propriedades elásticas necessárias a tornar o novo ligante asfáltico como detentor das qualidades desejáveis para a aplicação rodoviária é o copolímero, formado pela seqüência de estireno e de butadieno (SBS).

Além do mais, a compatibilidade também depende do CAP. Como o polímero têm duas extremidades aromáticas intercaladas por longa cadeia butadiênica, o entrosamento entre o polímero e o asfalto, não é tão simples. Logo deve haver um grau de aromaticidade ideal no CAP, que deve ser ajustado pela adição de agentes “compatibilizantes”, para permitir o perfeito entrosamento químico entre os produtos.

2.4.4) Interação do CAP com polímero do tipo “SBS”

Alguns pesquisadores afirmam que a atuação do CAP puro na mistura asfáltica, não garante bom desempenho das misturas, por exemplo, quando submetido a grandes cargas, a propriedade elástica da mistura desaparece. Acreditam eles que a adição de uma certa quantidade de polímero, SBS (copolímero estireno-butadieno), representado por um sistema de “molas”, concede ao ligante modificado propriedades diferentes do CAP puro.

O teor de polímero é determinado de modo a se adquirir as propriedades desejadas, contudo obedecendo a compatibilidade, significando um perfeito entrosamento entre o par polímero-asfalto e, sobretudo, dando maior estabilidade possível ao novo material. Na realidade este teor é tal que permita quimicamente a inversão da matriz, ou seja, deixe de ser uma matriz de CAP com pontos de polímeros, e passe a ser uma matriz polimérica com a estrutura do CAP.

Segundo MARTINHO (1993), a mudança no comportamento químico é difícil de se determinar. Procura-se então dentro das propriedades que mais interessam na aplicação rodoviária, um acompanhamento de forma relativamente fácil, através das mudanças das características físicas, físico-químicas e mecânicas. Os ensaios mais representativos são basicamente os seguintes:

- * Tensão × Deformação;
- * Viscosidade × Temperatura;
- * Estabilidade à estocagem;
- * Recuperação elástica;
- * Suscetibilidade térmica;
- * Módulo de rigidez

A adição dos elastômeros termoplásticos ao ligante asfáltico deve causar variações nas propriedades dos asfaltos modificando-as com relação a:

- ◇ Elevação da resistência ao envelhecimento (oxidação);
- ◇ Melhoria da susceptibilidade térmica;
- ◇ Elevação do ponto de amolecimento;
- ◇ Diminuição de temperatura do ponto de FRAASS;
- ◇ Aumento da ductibilidade;
- ◇ Aumento na viscosidade absoluta;
- ◇ Aumento de elasticidade;
- ◇ Aumento na adesividade e coesão.

2.4.5) Produção industrial e armazenamento do ligante modificado

A produção do ligante modificado utilizado pela COPERBO, consiste na incorporação do polímero ao asfalto, por meio de um processo de mistura mecânica, que basicamente compõe-se de um reator químico de ferro, provido de agitação mecânica e um sistema para aquecimento.

A produção começa com um concentrado de asfalto, agente compatibilizante e polímero, que, posteriormente vai sendo diluído em asfalto até obter a concentração desejada do polímero no asfalto. Ou seja, se para determinada utilização esse teor de polímero esteja alto, então vai adicionando-se mais asfalto até chegar ao o teor desejado.

Alguns cuidados referentes ao armazenamento e utilização dos asfaltos modificados devem ser tomados. Embora resulta em um produto homogêneo e estável termicamente, recomenda-se como medida preventiva, durante o armazenamento por um período superior a 5 dias, estocar o produto a uma temperatura mais branda que a usual,

entre 100 e 120^oC. Por ocasião de sua utilização, após este intervalo de tempo, a mistura de asfalto-polímero deverá ser previamente recirculada, por um período mínimo de 2 horas, com temperatura de 165/180^oC, conforme relatam REIS (1995) e DNER (1998).

2.4.6) Projeto de misturas e aplicação do concreto asfáltico modificado

REIS (1995), assegura que a preparação e a otimização da mistura asfáltica utilizando asfalto polímero deverá ser executado previamente em laboratório segundo os métodos de ensaios e especificações usuais (método Marshall).

Em relação a produção da massa asfáltica, utilizando polímero do tipo SBS, não exige modificação na usina de concreto asfáltico e, quanto a forma de produção, transporte e espalhamento são idênticas ao sistema convencional.

2.4.7) Temperaturas de aquecimento e compactação do asfalto polímero

A faixa de temperatura de aquecimento dos asfaltos modificados pode variar de 165 e 180^o C, conforme pesquisas realizadas no âmbito internacional e no país. Deve-se evitar ultrapassar os 190^o C, sob o risco de degradar o polímero.

Nas especificações de asfalto modificado para o polímero do tipo SBS elaboradas pelo DNER (1998) e apresentada em forma de relatório, mostra-se que a temperatura de aquecimento do asfalto polímero deve ser em função do teor do polímero. A temperatura conveniente para aquecimento do ligante é de 150^oC acrescida de 3^oC para cada 1% do polímero: 150^oC + 3^oC /1% de polímero. A temperatura máxima deve ser de 180^oC. Os agregados devem ser aquecidos a temperatura de 10^oC a 15^oC acima da temperatura do ligante asfáltico e inferior a 183^oC.

A temperatura recomendável para a compactação da mistura é de 140^oC acrescida de 3^oC para cada 1% de polímero: 140^oC + 3^oC/1% de polímero.

As especificações elaboradas pelo DNER (1998) para asfalto polímero do tipo SBS, bem como as para o CAP puro estão apresentadas no Apêndice “C”.

2.4.8) Viabilidade técnica e econômica

Para que um estudo possa apresentar viabilidade econômica, é preciso que além de apresentar a qualidade técnica, também apresente vantagens econômicas. O Apêndice

“D”, mostra-se um estudo de composição e comparação de custo para a massa asfáltica convencional e modificada com SBS, também uma composição de preço relativo à usinagem, espalhamento e compactação realizado pelo DNER (1998). FREITAS (1996) também apresenta um estudo comparativo de custo entre o concreto asfáltico convencional e concreto Asfáltico modificado com EVA.

Dados sobre o custo/benefício a técnica de AMP no Brasil ainda são incipientes, porém os trechos experimentais mais antigos têm evidenciado vantagens relevantes no desempenho que fortalecem o uso dos asfaltos modificados com polímeros. Visto que sua utilização tem verificado-se um prolongamento da vida do pavimento, diminuindo as manutenções periódicas fornecendo, portanto um solução efetiva em termos de custo/benefício.

Vantagens: O ligante polimerizado oferece inúmeras vantagens. É possível construir revestimentos com elevada resistência à deflexão, resistência à deformações plásticas, às trincas térmicas e ao envelhecimento, em locais sujeitos a intensa variação térmica.

Um outro fator decisivo para a viabilidade econômica está na redução da espessura equivalente, onde resultados práticos têm mostrado que o revestimento de asfalto modificado com polímero, permite obter misturas que possibilitem a redução de espessura até da ordem de 40% em relação ao ligante convencional, e mesmo assim garantindo uma vida útil bem superior (MARTINHO, 1993). Porém, estudos de OLIVEIRA (1997) evidencia-se a falta de critérios por parte dos fabricantes de polímeros, ao afirmarem a diminuição de até 50% a espessura da camada de revestimento, sem levar em consideração a interação entre o tráfego real e as características das misturas utilizadas. Apresenta em seu estudo, resultados de análise paramétrica da estrutura de um pavimento com 5cm e 15cm de espessura com amostras ensaiadas com CAP puro e CAP com 3, 5 e 7% de polímero. No primeiro caso o desempenho com amostra que possui 3% de polímero SBS foi superior a mistura convencional, no segundo caso a mistura com 7% de polímero foi a que apresentou melhor desempenho à convencional, em relação à fadiga. Enquanto que, na mistura com o teor de 5% de polímero e revestimento de 15cm, apresentou um desempenho inferior à convencional.

Conforme relata SANTOS & REIS (1992), nas misturas drenantes, os ligantes polimerizados tem permitido a utilização duradoura de misturas abertas do tipo drenante em função de sua maior coesão, com qualidade antiderrapante e evitando também a aquaplanagem.

Desvantagens: Alguns aspectos tem que ser levado em consideração, para a aplicação dessa tecnologia de asfalto aditivado com polímero: temperaturas altas, acima de 200°C levam a degradação de alguns polímeros; muitas misturas de asfalto modificado com polímero não apresentam estabilidade térmica à estocagem, provocando assim uma separação entre o polímero e o asfalto.

Em função dos custos atualmente elevados dos polímeros, os ligantes polimerizados só são indicados para condições onde o asfalto puro não é recomendado ou quando a redução de espessura seja possível e o justifique técnica e economicamente.

2.4.9) Aplicações de asfalto polimerizado

Em decorrência de suas inúmeras propriedades o asfalto polímero do tipo SBS é recomendado para os seguintes casos:

Misturas asfálticas densas: O asfalto polímero utilizado como ligante para concreto betuminoso usinado à quente proporciona ao revestimento: maior resistência à deformação permanente (plástica), aumento substancial da vida de fadiga, redução de espessura do revestimento da ordem de até 40%, melhor adesão e coesão frente à ação da água (MARTINHO, 1993). No Apêndice “E”, apresenta-se duas figuras que ilustram o comportamento de resultados de ensaio de trilha de rodas em misturas com asfalto puro e com asfalto modificado por polímero realizado Espanha.

Misturas drenantes (camadas abertas): O asfalto polímero permite a utilização duradoura das misturas abertas tipo drenantes devido a maior força de coesão e adesão que possibilita maior resistência à ação da água e ao despreendimento do agregado pelo tráfego, bem como, oferece resistência à perda da permeabilidade pelo selante dos vazios. Ou seja, oferece as seguintes vantagens (SANTO & REIS, 1992) e (REIS, 1995):
→ Maior espessura da película de asfalto e portanto menor envelhecimento do ligante (oxidação);

- Aumento do coeficiente de atrito da pista, evitando os riscos de derrapagem dos veículos e o “spray” (cortina de água) provocado pelos veículos em dias de chuva;
- Mais resistência a ação da água e ao deslocamento do agregado pelo tráfego;
- Possibilidade de projetar misturas abertas com alta resistência à deformação plástica.

Serviços de baixo custo: Devido as características coesiva, adesiva e elástica o asfalto polímero, tem sua aplicação a quente, ou a frio na forma de emulsão, com grande vantagem em serviços do tipo tratamento superficial e macadame betuminoso (MARTINHO, 1993). Embora apresente estas vantagens técnicas nestas aplicações, é indispensável uma análise de viabilidade econômica verificando o custo/benefício.

Selantes para juntas e trincas em pavimento rígido e flexível: Conforme relata REIS (1995) de que o asfalto polímero apresenta ótima adesão ao substrato (base), boa resistência ao escorrimento (fluência) à altas temperaturas, além de possuir flexibilidade e elasticidade capaz de superar as eventuais dilatações e contrações ocorridas.

Membranas de absorção de tensões (SAM): Consiste na aplicação de uma película asfáltica com elastômero entre o pavimento trincado e a camada de recapeamento, sendo desenvolvido na Austrália, conforme relata FARAH (1987). Tem sido também amplamente empregado nos EUA quando se deseja prevenir trincamentos no pavimento que se refletem através de recapeamentos. Normalmente, este material é aplicado na forma de tratamento superficial simples, com aproximadamente 20% de borracha adicionada ao cimento asfáltico, denominado de membrana absorvedora de tensão (SAM: Strees Absortion Membrane) ou então, aplicado como uma camada intermediária de membrana absorvedora de tensão (SAMI: Stress Absorption Membrane Interlayer) e superposto por uma camada fina de concreto asfáltico (WISNIEEWKI, 1986).

Conforme relatam estes pesquisadores citados, as membranas absorvedoras de tensões apresentam manutenção das propriedades elásticas sobre uma larga faixa de temperatura, boa adesão entre o revestimento antigo e o novo (entre as camadas), além da absorção das tensões possibilitando diminuir a espessura da nova camada asfáltica.

Mantas impermeabilizantes à base de asfalto polimerizado: Existem alguns tipos de mantas asfálticas aditivadas com polímeros para as mais diversas aplicações em serviços de impermeabilização em serviço de construção civil, tais como: lajes maciças, cortinas

em contato com o solo, lajes de estacionamento para tráfego, pontes e galerias e outros. Mostrando-se algumas vantagens como: boa flexibilidade, ampla faixa de resistência a temperatura, elevada durabilidade. Porém, salientado-se que são informações de catálogos (VIAPOL) sem no entanto ter citações ou informações de aplicações práticas e seus respectivos desempenho.

2.4.10) Estudo de ligante modificado – Em laboratório

Num estudo criterioso, é conhecida a composição dos diversos asfaltos, então é possível relacionar seus componentes, verificando o estado de equilíbrio coloidal, como também a compatibilidade e as proporções limites de adição de compostos macromoleculares (polímeros).

Nas experiências realizadas em laboratório têm-se verificado que certos tipos de polímeros tendem a se separar do asfalto. Para corrigir este fato, a agitação contínua ou o emprego de agentes químicos que provocam uma interação de ordem química entre certos componentes do asfalto e o polímero, são artificios recomendados de estudos bibliográficos. E alguns desses aditivos são protegidos por patente, tendo na sua compatibilização o sigilo comercial.

As pesquisas realizadas quanto ao tipo e teores de polímeros adicionados ao asfalto têm-se observado conclusões importantes. Nos estudos de laboratório, tem-se verificado segundo MARTINHO (1993) e MARTINHIO et alii (1994) que o teor de 6% do copolímero SBS, é o que oferece maior modificação com melhorias, nas características físicas do asfalto de origem, enquanto o DNER (1998) indica um teor de 4 à 6%. A adição de SBS com esse teor, torna o asfalto menos susceptível à variação térmica, e assim mais resistente à deformação plástica.

No estudo de avaliação e controle das modificações das propriedades do asfalto com adição do polímero são, normalmente empregados os ensaios convencionais para a caracterização do CAP, além de outros mais específicos, a fim de melhor comprovar as alterações, tais como: tensão e deformação, recuperação elástica, módulo de rigidez e estabilidade a estocagem.

Embora os resultados obtidos nas pesquisas de SALATHÉ et alii (1990), MARTINHO (1993), MARTINHO et alii (1994 e 1995), OLIVEIRA (1997), DNER

(1998) e outros pesquisadores em laboratório tenham sido animadores, há de se concordar que somente o emprego prático poderá atestar os resultados da aplicação destes tipos de ligantes. Desse modo estará apto a comparar os reflexos característicos das misturas constituintes, quando submetido à ação real do tráfego e dos agentes do intemperismo.

Os principais estudos de laboratório são realizados por meio dos seguintes ensaios:

a) Ensaio de tração e deformação

Aplicável como forma comparativa entre o asfalto puro e os ligantes modificados, indicando a deformação e a energia necessária para a rutura, ou seja, tem como objetivo de avaliar as propriedades elásticas das misturas de asfalto com polímero. O método que se tem utilizado é o ASTM D-638-64T.

b) Índice de suscetibilidade térmica

É o ensaio que verifica a influência das variações de temperatura na consistência do asfalto. Os estudos de laboratório têm mostrado que à medida que a temperatura aumenta o asfalto amolece e conseqüentemente a penetração (P) aumenta, portanto caracterizando a sensibilidade dos CAPs às variações de temperatura.

Pfeiffer e Van Doormal definiram uma equação que relaciona as medidas de penetração a 25^oC e o ponto de amolecimento, e constitui uma indicação do grau de suscetibilidade dos asfaltos. O estabelecimento da fórmula baseia-se em alguns coeficientes experimentais arbitrários e na hipótese de que à temperatura correspondente ao ponto de amolecimento, todos os asfaltos possuem penetração igual a 800 (1/10 mm).

O índice de suscetibilidade térmica (IST) ou índice de Pfeiffer e Van Doormal é o mais correntemente usado e faz parte das especificações brasileiras. Este índice é obtido pela fórmula:

$$IST = \frac{500 \log P + 20PA - 1951}{120 - 50 \log P + PA} \quad (2.1)$$

onde: P = valor da penetração;

PA = temperatura correspondente ao ponto de amolecimento;

IST = índice de suscetibilidade térmica

O índice de suscetibilidade térmica de Pfeiffer e Van Doormal nas especificações brasileiras pode variar de (-1,5) a (+1). Valores maiores que (+1) indicam asfaltos oxidados, ou seja, pouco sensíveis a elevadas temperaturas e quebradiços quando a temperatura é baixa, enquanto valores menores que (-1,5) indicam asfaltos muito sensíveis a altas temperaturas, ou seja amolecem rapidamente (escoamento viscoso).

Conforme relata PERISÉ et alii (1994) outros índices que leva em consideração a variação da penetração com a temperatura é o PVN (Penetration viscosity number) desenvolvido por Mcleod (1985) que é um índice calculado a partir da viscosidade (cSt a 135^oC) e penetração a 25^oC; e também o PVN 60 adaptado por Dimpfl e Goodrich (1986), é uma adaptação da equação do PVN, com a viscosidade empregada é absoluta a 60^oC (Poise). Um índice que também procura caracterizar a suscetibilidade térmica é o ponto de ruptura FRAASS (Fraass Breaking Point). É um ponto que na temperatura correspondente começa a aparecer pequenas fissuras no asfalto, porém admite-se que nesta temperatura a penetração corresponda a um valor próximo de 1,25 (0,1mm).

A suscetibilidade térmica (S.T.) é uma propriedade importante as ser analisada no asfalto polimerizado, sabendo-se que o asfalto tem uma variação de consistência em função da temperatura e, portanto podendo haver alterações importantes no seu comportamento reológico com a adição do polímero.

O que se tem verificado através das pesquisas já realizadas em laboratório é que tem havido uma diminuição da suscetibilidade térmica quando da adição do polímero ao asfalto. A incorporação do polímero ao asfalto tem geralmente por finalidade a redução dessa suscetibilidade, ampliando a faixa que separa a fragilidade a frio do amolecimento a quente (FREITAS, 1996).

c) Estabilidade à estocagem

Este ensaio é considerado importante para avaliar a estabilidade dos asfaltos modificados com polímeros, quanto a estocagem e transporte. É avaliado através de um teste bastante simples, que caracteriza amostras retiradas no topo e fundo das misturas de asfalto modificado com polímero (AMP), permanecidas durante cinco dias a 150^o C. Ou seja, basta realizar ensaios de penetração e ponto de amolecimento, com amostras retiradas do topo e fundo do reservatório para verificar a sua estabilidade. Para LEITE et

alii (1995), a mistura que possui diferença próxima de zero do ponto de amolecimento, entre topo e fundo, é dita monodispersa e portanto compatível; já a mistura que possui diferença superior a 2^oC, não atende a este critério e é dita incompatível.

A Tabela 2.3 apresenta os resultados encontrados por SALATHÉ et alii (1992), em estudo aplicado a uma pista experimental.

Tabela 2.3: Estabilidade à Estocagem (SALATHÉ et alii, 1992)

Amostras	RLAM		RLAM		REDUC		REDUC	
	+4% Tr-1101 (SBS)		+4% Tr-2032 (SBS)		+4% Tr-1101 (SBS)		+4% Tr-2032 (SBS)	
Ensaio	TOPO	FUNDO	TOPO	FUNDO	TOPO	FUNDO	TOPO	FUNDO
PENET. 0,1mm (25 ^o C)	66,0	47,0	72,0	45,0	62,0	62,0	62,0	62,0
PONTO AMOLEC. (^o C)	82,5	54,4	69,9	56,1	59,9	58,5	58,6	58,8

O asfalto da REDUC apresentou mistura bastante estável com CAP SBS enquanto as misturas com asfalto da RLAM, apresentaram resultados instáveis e necessitavam para a sua estabilização, o emprego de um processo que permite a constante misturação, para evitar a segregação do polímero. Uma outra forma de contornar a separação do polímero é promover uma reação entre o polímero e o asfalto, por meio da adição de um agente de reticulação (MARTINHO, 1993).

d) Recuperação elástica (RE)

O ensaio de recuperação elástica é muito útil, na avaliação da característica elástica de um ligante modificado, sendo aplicado no controle e para comparação entre ligantes analisados.

Segundo WISNIEWSKI (1986), a modificação da resposta de elasticidade nos asfaltos, através da adição de polímero, vem melhorar o desempenho de serviço, fazendo com que a deformação do asfalto seja menos dependente da temperatura e da razão de carregamento, e possivelmente, aumentando a resistência. O grau de modificação “elástica” depende do tipo de polímero utilizado e de sua concentração.

Além do aparelho Tensiômetro, em que se mede a tensão aplicada e o alongamento, as propriedades elásticas dos asfaltos modificados podem ser evidenciadas por meio de um aparelho mais simples e menos custoso que é o ductilômetro. A metodologia apresentada no trabalho de Poirier et alii (1991) apud SATAHÉ et alii (1992), consiste na distensão de apenas 20 cm da amostra do ligante, moldado conforme determina o ensaio de ductibilidade (P.M.B.-167), seguido do corte a 10cm das extremidades. A temperatura do banho é de 10⁰ C e, após uma hora, é feita a medição de retração, isto é, a distância entre as extremidades seccionadas.

A recuperação elástica (RE), é medida pela percentagem, da relação entre a distância entre as extremidades seccionadas e a distância total de 20 cm.

SALATHÉ et alii (1992) apresentam três classes de asfaltos modificados com polímeros (AMP), baseado no valor da recuperação elástica do asfalto, como segue:

CLASSE “J”: Um asfalto modificado com polímero (AMP) da classe “J”, é um ligante elastomérico que apresente mais de 40% do valor da recuperação elástica a 10⁰ C. Abaixo deste valor, não tem sentido se dizer que o ligante foi modificado.

CLASSE “N”: Um AMP da classe “N”, é dito um ligante elastomérico que apresenta, mais de 60% de recuperação elástica (RE). É um ligante cujas propriedades elastoméricas crescem com a temperatura.

CLASSE “S”: Um AMP da classe “S”, é um ligante elastomérico que apresenta mais de 80% de recuperação elástica (RE). É um ligante cujas propriedades elásticas crescem com a temperatura, e sua suscetibilidade térmica foi modificada.

Segundo SANTOS & REIS (1994), os asfaltos não modificados raramente apresentam recuperação elástica acima de 10%, enquanto a dos asfaltos modificados depende do tipo e quantidade do polímero adicionado. A Tabela 2.4, apresenta resultados de recuperação elástica, em estudo das empresas COPERBO/G-4 Engenharia sobre asfalto modificado com polímero SBS, apresentado por MARTINHO (1993).

Tabela 2.4: Recuperação Elástica à 10⁰C (MARTINHO, 1993)

A MOSTRAS DE ASFALTO	RLAM +4% SBS	REDUC +4% SBS	REDUC +6% SBS
VALOR MÉDIO RE (%)	61	68	81

e) Envelhecimento do asfalto polímero

O envelhecimento do asfalto polímero é de suma importância, pois um produto que agrega custo adicional, deve-se mostrar melhor desempenho levando o revestimento a uma maior vida útil. Os cimentos asfálticos de petróleo são afetados pelo contato do oxigênio do ar, pela radiação solar dos raios ultravioletas e infravermelho, por variação térmica e pressão.

O comportamento do envelhecimento em laboratório, sob influência da pressão atmosférica de oxigênio e temperatura, em estufas apropriadas, revelam alguns mecanismos de deterioração do asfalto, sendo os principais: perda da fração leve e oxidação. A perda das frações leves, que é resultante da temperatura e das condições de exposição, geralmente ocorrem no processo de usinagem da massa asfáltica, representando uma proporção de envelhecimento menor, uma vez que o CAP não apresenta grande volatilidade. A oxidação é na verdade um envelhecimento químico pelo ganho de oxigênio nas moléculas insaturadas. Este processo é exponencialmente aumentado quanto maior for sua temperatura e pressão (DNER, 1998).

Em termos gerais, a estrutura do ligante envelhecido caminha para uma instabilização, com o aumento de viscosidade e de rigidez, tornando o ligante inadequado para a função que terá que desempenhar quando das solicitações das cargas e do clima. Entretanto o sistema CAP-SBS induz a esperar alteração neste comportamento, devido à enorme quantidade de duplas ligações introduzidas através das longas sequências butadiênicas. O SBS tem no seu seio pequenas quantidades de anti-oxidante, que se destinam a evitar ou retardar a ação do oxigênio sobre suas ligações insaturadas, ou seja, essas próprias duplas ligações funcionam como anti-oxidante em relação ao CAP. Por essa razão, o sistema CAP-SBS deve apresentar maior resistência à oxidação, e em consequência, sua vida útil deve ser bem maior na pista.

Muitos métodos têm sido desenvolvidos, com a finalidade de estudar o comportamento do envelhecimento do ligante no laboratório, de forma a se ter uma relação com o ocorrido no campo. Os métodos mais empregados atualmente segundo o DNER (1998) são:

→ Método do efeito do calor e do Ar (ECA);

- Método rolling thin film oven test (RTFOT);
- Método tilt oven test (TOT);
- Vaso de envelhecimento sob pressão (Pressure Aging Vessel-PAV).

2.4.11) Estudo de mistura com ligante modificado - Em laboratório

a) Ensaio Marshall

Entre os vários métodos desenvolvidos para medir a resistência à deformação da mistura asfalto-agregado, o de maior divulgação é o método adotado pelo DNER, que é o MARSHALL. A confiabilidade que a pesquisa do Corpo de Engenheiros do Exército Americano realizada em 1948 conferiu ao método Marshall aliada à simplicidade, rapidez de execução e ao baixo custo dos equipamentos requeridos pelo ensaio Marshall, geraram a propagação e a adoção do método por diversos organismos rodoviários do mundo todo, inclusive do Brasil (COELHO, 1992). Ainda hoje, as versões mais atualizadas do método Marshall no Brasil, são recomendados como critério quase exclusivo para a composição de misturas betuminosas para pavimentação.

É um ensaio que têm sido também muito criticado por apresentar certas limitações, como alta dispersão dos resultados, dificuldade de interpretação teórica das tensões impostas durante o ensaio além de não apresentar correlação com o desempenho em campo. Embora sabe-se que ainda é um parâmetro de referência no Brasil. Apesar de suas limitações, este ensaio dá uma indicação do comportamento em termos de resistência e deformação do concreto asfalto, os resultados desse ensaio, com o asfalto modificado tem servido como parâmetro de comparação do seu comportamento com outras misturas feitas com asfalto puro, e portanto incluído neste estudo.

Os resultados obtidos pela COPERBO/G-4 Engenharia com misturas com ligantes puro e modificados para avaliação de desempenho, são apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Comparação de CAP puro e polimerizado (MARTINHO, 1993)

LIGANTES MARSHALL	CAP85/100 RLAM	RLAM +SBS	CAP85/100 REDUC	REDUC +SBS
Estabilidade (Kgf)	836	1085	810	1060
Fluência (1/100")	15	15	16	15

Os resultados de estabilidade Marshall com as misturas polimerizadas, demonstraram melhorias, em relação ao ligante puro. Nota-se que os resultados desses ensaios juntamente com outros como módulo de resiliência e resistência à tração têm sido importante para a análise do comportamento do asfalto modificado. A Figura 2.2, mostra uma ilustração de um corpo-de-prova na prensa Marshall, e indicação da forma de solicitação que leva à ruptura através de uma compressão diametral, parcialmente confinada.

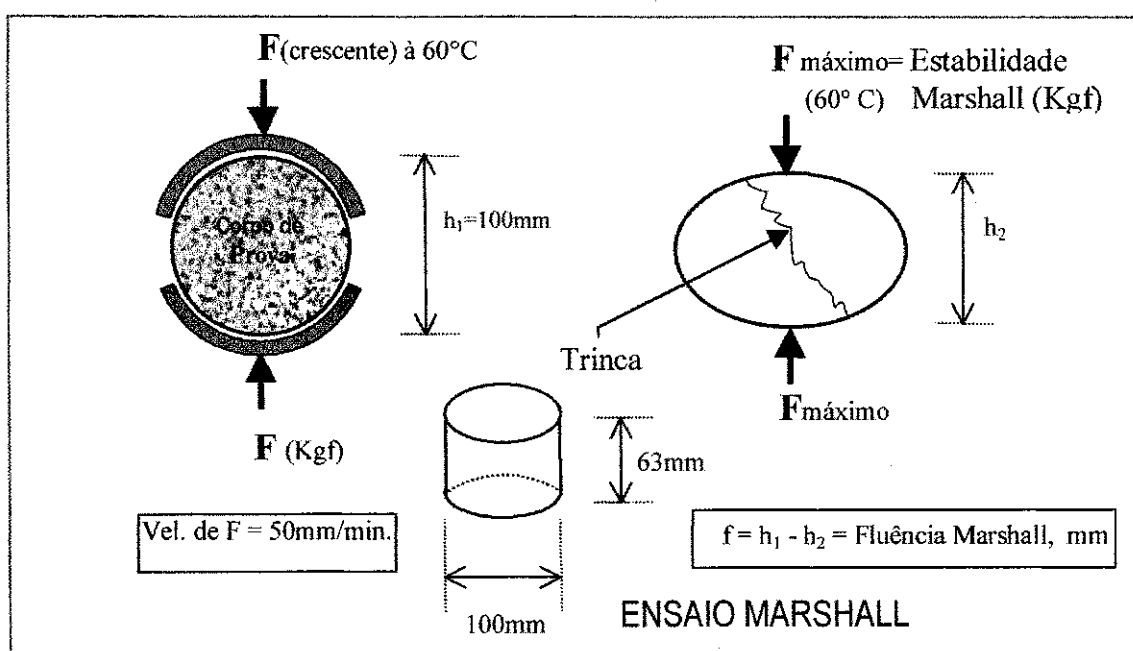


Figura 2.2: Ilustração do corpo-de-prova na prensa Marshall

Apesar de bastante empregado, o ensaio Marshall apresenta alta dispersão de resultados e dificuldades de interpretação teórica das tensões impostas durante o ensaio, modo de ruptura indefinido e falta de correlação com desempenho em campo. A tendência atual é substituir o ensaio Marshall pelos ensaios de módulo de resiliência e de resistência à tração estática.

b) Adesividade

Uma qualidade pretendida com a incorporação do polímero ao asfalto, é que o ligante modificado venha a apresentar boa adesividade.

Como já dito, a adesividade é a maior ou menor resistência que um CAP que cobre um agregado, oferece ao seu deslocamento pela água. A adesividade é pois uma propriedade do par asfalto/agregado e não propriamente do CAP.

Os técnicos rodoviários dividem a adesividade em duas componentes básicas:

Adesividade ativa: Mede a capacidade de envolvimento do agregado pelo ligante, ou seja, a facilidade de adesão asfalto/agregado.

Adesividade passiva: Mede a resistência ao deslocamento do par asfalto/agregado, ou seja, a dificuldade de separação.

São vários os ensaios usuais no meio rodoviário, pois os técnicos necessitam de ensaios rápidos e conclusivos que lhes permitam julgar a qualidade dos materiais que vão usar na construção, no tocante a adesividade do ligante ao agregado. Os ensaios que o DNER adota são do Road Research Laboratory (DNER-ME 78-63) e o método Riedel-Weber (DNER-ME 79-63).

Os ensaios de adesividade usualmente utilizados no meio rodoviário medem a capacidade da película de ligante que envolve o agregado vencer a competição com a água, resistindo ao seu deslocamento, sob condições padronizadas de ensaio.

Os agregados usados em pavimentação são bastante estudados e conhecidos quanto às suas características físicas e mecânicas. Entretanto, muito pouco tem sido falado a respeito da contribuição química dos diversos tipos de materiais inorgânicos (agregados) que tomam parte num pavimento betuminoso.

Para o entendimento da adesividade é preciso que se tenha visão do que significa a distribuição superficial dos constituintes químicos dos agregados. Nenhum agregado tem na sua superfície somente pontos de mesma polaridade (positiva ou negativa), já que as moléculas que o constituem são neutras (MARTINHO et alii, 1995). Pode-se representar simplificadaamente os agregados em dois tipos: os ácidos ou silicosos (negativos) e os básicos calcários (positivos).

Em ambos os casos, a superfície do agregado apresentará ampla distribuição de cargas positivas e negativas, mas de forma desbalanceada em função de sua natureza, assim sendo, os agregados ácidos constituídos fundamentalmente por silicatos (rochas ácidas tipo granito, gnaisse e quartzito), pelo seu alto teor de oxigênio terão forte preponderância de pontos negativos em sua superfície, enquanto os agregados básicos

(rochas básicas como o agregado do calcário) constituídos fundamentalmente pelos carbonatos, terão preponderância de pontos positivos em sua superfície.

No caso do CAP, observa-se que geralmente a adesividade a qualquer tipo de agregado (ácido ou básico) é pelo menos razoável, mas em geral é melhor em materiais básicos e, em particular o calcário.

Adota-se usualmente para melhorar a adesividade, a adição de produtos químicos, chamados dopes, em pequenas quantidades (0,5% a 1,5% em peso) no asfalto. Pode-se, também melhorar adesividade de um agregado eletronegativo, adicionando-se pequena porcentagem de filer eletropositivo, como exemplo, a cal hidratada e o cimento Portland, que passam a atuar não somente como material de enchimento, mas também atuam quimicamente com certos ácidos orgânicos dos ligantes betuminosos, dando como resultado, sais de cálcio, que tem atividade superficial (SOUZA, 1976).

c) Coesão

Perda por desgaste: Os ensaios mecânicos existentes até 1980 não permitiam caracterizar claramente o comportamento mecânico da mistura em termos de coesão do sistema agregado/ligante. Eram ensaios destinados a avaliar a estabilidade da massa asfáltica que resultavam inadequados para determinar outras propriedades distintas (SANTOS & REIS, 1992).

Por esta razão se desenvolveu “Ensaio Cantabro de Perda por Desgaste”, destinado a medir a resistência da mistura à desagregação, ou seja, o ensaio permite avaliar a coesão de misturas drenantes.

Este método de resistência a abrasão foi desenvolvido na Espanha pelo Eng^o Francisco Achutequi. Consiste em introduzir um corpo de prova Marshall em uma máquina de desgaste Los Angeles, sem as esferas, à temperatura ambiente e, após 300 rotações do tambor, determina-se a perda de peso, ou seja a porcentagem do produto perdido na abrasão. Observa-se que, este desgaste é tanto maior quanto menor for a coesão da mistura. As literaturas estrangeiras recomendam que o desgaste não seja superior a 35% neste ensaio.

A função do ligante nas misturas betuminosas é de proporcionar coesão entre agregados. Neste sentido, SALATHÉ et alii (1990) realizaram estudo comparativo entre

Marshall, por uma carga “F” de compressão distribuída ao longo de suas geratrizes por dois frisos curvos de carga posicionados na parte superior e inferior da amostra conforme ilustrado na Figura 2.3.

A teoria da elasticidade associada aos dados fornecidos pelo ensaio permitiram o desenvolvimento de equações para o cálculo das tensões de tração (2.8) e compressão (2.9) que ocorrem no plano diametral horizontal, perpendicular a carga (F) aplicada, conforme apresentado na Figura 2.4 (a).

$$\sigma_x = \frac{2F}{\pi \cdot t \cdot d} \left(\frac{d^2 - 4X^2}{d^2 + 4X^2} \right)^2, \quad (2.8) \quad \sigma_y = \frac{-2F}{\pi \cdot t \cdot d} \left[\frac{4d^2}{(d^2 + 4dX^2)} - 1 \right], \quad (2.9)$$

Onde: t – altura da amostra;

d – diâmetro da amostra;

X – abcissa – distância horizontal ao centro;

σ_x - tensão de tração;

σ_y – tensão de compressão.

A distribuição das tensões no plano diametral vertical ocorre conforme apresentado na Figura 2.4 (b), as tensões de tração (2.10) e compressão (2.11) são calculadas pelas seguintes expressões:

$$\sigma_x = \frac{2F}{\pi \cdot t \cdot d}; \quad (2.10) \quad \text{e} \quad \sigma_y = \frac{-2F}{\pi \cdot t \cdot d} \left(\frac{2d}{d - 2y} + \frac{2d}{d + 2y} - 1 \right); \quad (2.11)$$

Quando a carga vertical (F) atinge um valor máximo capaz de romper o corpo-de-prova a tensão de tração no plano diametral vertical corresponde a resistência à tração estática do material, calculada por:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi \cdot t \cdot d}; \quad (2.12)$$

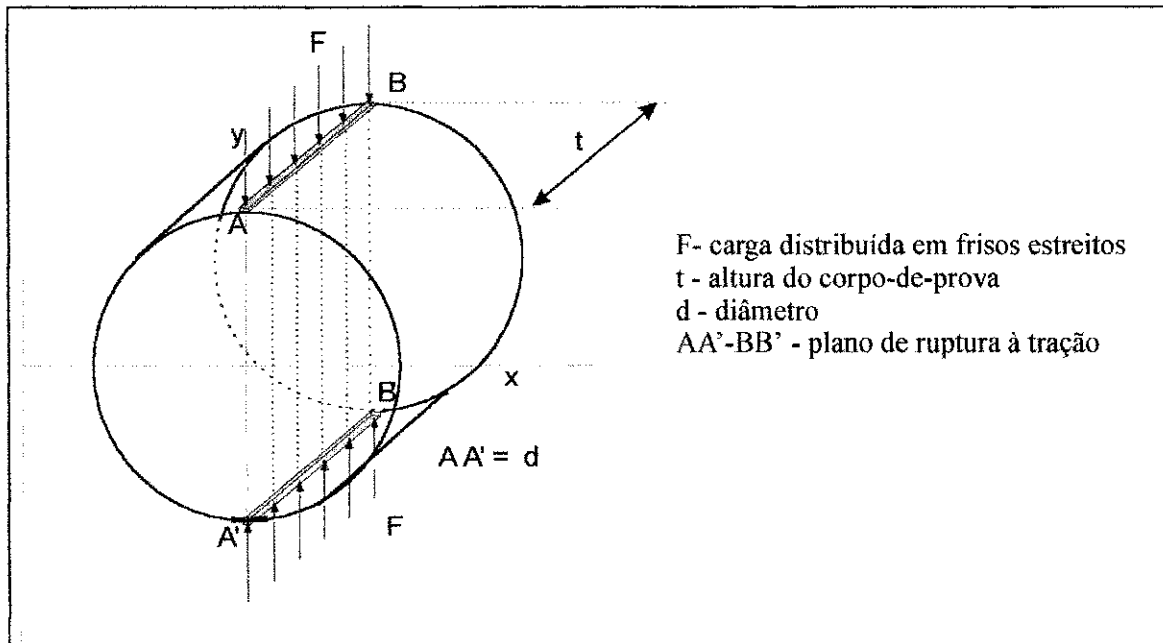


Figura 2.3: Ensaio de tração indireta em amostra cilíndrica

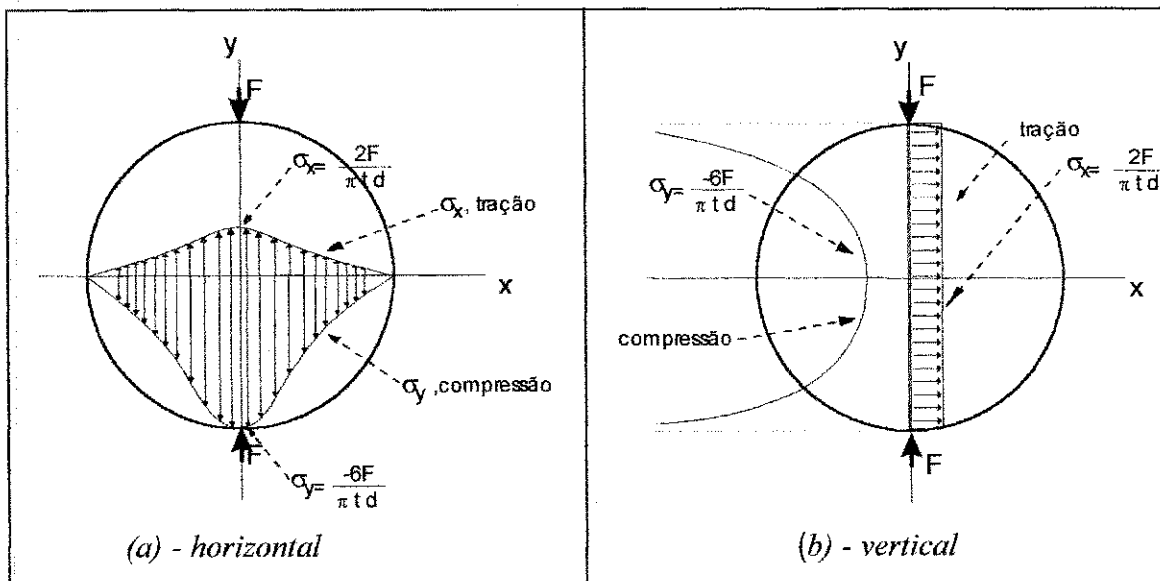


Figura 2.4: Distribuição das tensões de tração e compressão nos planos diametraes, segundo FROCHT (1948)

e) Módulo de resiliência (MR)

O módulo de resiliência sob carga repetida é um fator muito importante na definição do dimensionamento racional dos pavimentos e, que está intimamente ligado ao projeto de mistura.

A avaliação estrutural está relacionada ao estado de tensões in loco produzidas pelas rodas carregadas, em movimentos transientes sobre a superfície do pavimento. Para tal é indispensável considerar as propriedades dos materiais constituintes do pavimento. É necessário desenvolver uma filosofia mais aprimorada de caracterização das misturas asfálticas para otimizar os projetos de pavimentos.

O módulo de resiliência é a razão entre a tensão e a correspondente deformação específica recuperável, quando as misturas asfálticas são submetidas a carregamento repetido. Muitas vezes se compreende o módulo de resiliência incorretamente como o módulo de elasticidade, quando testes de laboratório e análise de campo têm demonstrado, que os materiais asfálticos não se comportam como elástico lineares devido a relação entre a tensão e a deformação ser dependente da taxa de aplicação de carga, do tempo e da deformação sob um nível constante de tensão, e do grau de retorno do material a posição original tão logo seja aliviado o esforço (PINTO, 1991).

Cada vez mais cresce o consenso mundial para o emprego do módulo de resiliência como parâmetro adequado para a avaliação do comportamento mecânico das misturas asfálticas. Este ensaio é padronizado pelo DNER (ME-133/94), é feito através do uso de equipamento de compressão diametral dinâmico, utilizando-se corpos-de-prova Marshall.

O módulo de resiliência determinado em ensaios de compressão diametral é obtido pela relação entre a tensão de tração normal ao plano diametral vertical e a correspondente deformação específica resiliente nesse plano. Uma carga “F” distribuída num friso estreito causa compressão na direção vertical e tração na horizontal. Medindo-se o deslocamento horizontal, que é o somatório dos $\epsilon_h \cdot \Delta_d$, sendo Δ_d é o segmento horizontal segundo o diâmetro e ϵ_h deformação específica em cada ponto do diâmetro horizontal, pode-se segundo FROCHT (1948), pela teoria da elasticidade deduzir o módulo de elasticidade.

A deformação específica horizontal (ϵ_x), num ponto distante de x do centro é:

$$\epsilon_x = \frac{2}{E} \frac{F}{\pi \cdot t \cdot d} \left[\frac{4d^4 - 16d^2 X^2}{(d^2 + 4X^2)^2} + (1 - \mu) \right]; \quad (2.2)$$

onde: E – módulo de elasticidade e μ - coeficiente de poisson

A deformação total horizontal (Δ) é obtida por integração da expressão anterior

no intervalo $(-\frac{d}{2}; +\frac{d}{2})$:

$$\Delta = \int_{-d/2}^{d/2} \epsilon_x \, d_x; \quad (2.3)$$

Obtém-se a expressão (2.4) para o cálculo do módulo de elasticidade (E) para diâmetro de 10,16cm (4").

$$E = \frac{F}{\Delta \cdot t} (\mu + 0,2734); \quad \text{onde: } t - \text{altura da amostra} \quad (2.4)$$

No caso de materiais viscoelásticos, como as misturas asfálticas, a equação acima permite calcular o módulo de resiliência ($E=MR$) desde que o carregamento repetido seja pontual e de curta duração, a fim de minimizar o comportamento viscoso da mistura asfáltica.

Conforme relata MEDINA (1997) a aplicação da teoria da elasticidade a misturas asfálticas só é possível a níveis de tensão de tração baixas, menos de 50% em relação à de ruptura e a temperaturas inferiores a 40⁰C. Adota-se o coeficiente de poisson de 0,25 a 0,30 para as misturas asfálticas.

O ensaio consiste em solicitar a amostra dinamicamente a níveis de tensão menor que 50% da tensão correspondente a ruptura das amostras, distribuída ao longo das geratrizes opostas, e medir a deformação resiliente (Δ) ao longo do diâmetro horizontal, perpendicular a carga F aplicada repetidamente. As deformações horizontais são medidas através de dois medidores eletromecânicos tipo LVDT (Linear Variable Differential Transformer).

Na prática aplica-se a carga por meio de um friso curvo de 1,27cm (corda). Tem-se a expressão para o módulo de resiliência:

$$MR = \frac{F}{\Delta \cdot t} (0,9976 \mu + 0,2692); \quad (2.5)$$

Onde: MR – módulo de resiliência em Kgf/cm^2 ;

F - carga aplicada diametralmente na amostra, kgf;

Δ - deslocamento resiliente horizontal total, cm;

t - altura da amostra, cm;

μ - coeficiente de poisson.

Aos laboratórios que não dispõem de aparelhagem necessária, recomenda-se o uso do ensaio de compressão diametral estático (DNER-138/94), como parâmetro de estimativa do módulo de resiliência. É um ensaio que é facilmente executado utilizando a prensa Marshall, porém sem envolver o corpo-de-prova no molde de compressão. Deve-se utilizar como suporte somente dois frisos de carga de pequena largura. Este ensaio permite determinar a resistência à tração estática (σ_t) que mostra grande correlação com o módulo de resiliência (MR). Uma correlação obtida para várias misturas já ensaiadas na COPPE, tanto de laboratório quanto de campo (MOTTA & PINTO, 1994).

$$MR=343+4028\sigma \quad \text{Sendo: } r^2=0,550 \quad (2.6)$$

Para ante-projetos, ou projetos de estradas secundárias, é possível estimar o módulo através deste tipo de correlação, e assim dimensionar mais racionalmente os pavimentos.

A tendência hoje é de se usar ensaios que possam medir as propriedades dos materiais durante a fase de dosagem que representem solicitações de compressão e cisalhamento quando se tratar de deformações permanentes e tração na flexão para os defeitos estruturais ocasionados por fadiga (MOTTA et alii, 1996).

Com as técnicas computacionais disponíveis, permite-se quantificar as tensões e deformações num dado perfil de um pavimento de maneira rápida e econômica e estimar a vida de fadiga em cada caso estudado. Para tal, é necessário conhecer as características de fadiga e propriedades resilientes dos materiais que constituem a estrutura.

f) Fadiga

A fadiga é o processo de deterioração estrutural que sofre um material quando submetido a um estado de tensões e de deformações repetidas, resultando em trincas ou fratura completa após um número suficiente de repetições do carregamento, que pode ser

bem menor do que a carga de ruptura estática do material. Ou seja, é a perda de resistência que o material sofre, quando solicitado repetidamente por uma carga (MOTTA & PINTO, 1994).

Têm-se observado que o principal defeito dos pavimentos flexíveis no Brasil constituídos por bases e sub-bases granulares revestidas de concreto asfáltico, é o trincamento progressivo deste, sob a ação de cargas repetidas dos caminhões. Nota-se que o fenômeno da fadiga afeta toda as estruturas sujeitas a cargas repetidas.

O fenômeno da fadiga consiste na ruptura ou na fissuração do revestimento, induzido pela repetição de carga muito menor que sua resistência a tração. Para que se possa avaliar o número de solicitações que vai provocar este fenômeno, existem vários ensaios de laboratório que usam corpos-de-prova e modos de solicitações diferentes. Os ensaios propostos para obtenção de modelos de fadiga em laboratório, a maioria utilizando ensaios dinâmicos ou de cargas repetidas, sendo estes modelos considerados imprescindíveis quando se pretende fazer um dimensionamento racional de pavimentos.

O ensaio mais comum em utilização no Brasil é o de compressão diametral dinâmico, já normatizado para a obtenção do módulo de resiliência (DNER ME-133/94). Este ensaio tem a seu favor a simplicidade de execução, a facilidade de obtenção dos corpos de prova (cilindros Marshall ou a sonda rotativa) e a boa representação do estado de tensões, que se processa no campo no revestimento.

Segundo MOTTA & PINTO (1994), outro ensaio também utilizado no Brasil é o de flexão alternada, onde vigotas de misturas asfáticas são submetidas a duas cargas simétricas em relação ao centro da vigota, o que produz um estado de tração na parte central, entre os dois pontos de carga. Ou seja, é um ensaio de flexo-tração a cargas repetidas utilizando-se corpos-de-prova em forma de vigotas. Conforme relata MEDINA (1997) o equipamento de flexo-tração foi desenvolvido por Ceratti (1991) em sua tese de doutorado. As dimensões das vigotas adotadas são de $7,72 \times 7,62 \times 45,68$ cm.

Os dois ensaios citados são feitos a carga repetida, com equipamentos especialmente preparados, que podem aplicar carregamentos cíclicos sob regime de tensão controlada ou deformação controlada. Os critérios de ruptura nos dois ensaios são diferentes, embora expressos por relações do mesmo tipo:

$$N = K_1 \left(\frac{1}{\sigma} \right)^{n_1} \quad \text{ou} \quad N = K_2 \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^{n_2} \quad \text{ou} \quad N = K_3 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_3} \quad (2.7)$$

Onde: N= vida de fadiga expresso em número de solicitações de carga;

σ = tensão de tração repetida;

ε = deformação de tração repetida;

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

$K_1, n_1, K_2, n_2, K_3, n_3$ = são parâmetros de fadiga determinados experimentalmente.

No entanto, como a maioria dos laboratórios brasileiros ainda não se aparelhou para fazer este ensaio, sugere PINTO (1991) e MOTTA & PINTO (1994), o uso de um ensaio estático mais simples para obter modelos aproximados de fadiga.

Esta proposta consiste em utilizar uma prensa de adensamento convencional de solos, para aplicar carregamentos estáticos a corpo de prova tipo Marshall e medir a deformação dos mesmos ao longo do tempo, de forma que se possa obter uma lei de variação de deformação plástica acumulada com o tempo.

O interesse dos pesquisadores em relação ao asfalto polímero é também de verificar o comportamento da fadiga, pois sabe-se que é de interesse para o dimensionamento racional dos pavimentos, já que leva em consideração as características de fadiga e as propriedades resilientes.

Em estudo de SALATHÉ et alii (1992), analisou-se o comportamento de uma determinada pista experimental com asfaltos modificados, onde a previsão do desempenho em relação a vida de fadiga com a deformação específica resiliente, a temperatura de 25^oC, obtida em laboratório está apresentado graficamente através da Figura 2.3. A deformação específica resiliente é obtida durante a realização do ensaio de módulo de resiliência à tensão controlada. Verificou-se que à medida que a deformação aumenta, a vida de fadiga das misturas diminuem, sendo que a mistura com o ligante EVA é que apresenta maior redução, e a mistura com ligante SBS e a mais resistente (Figura 2.5).

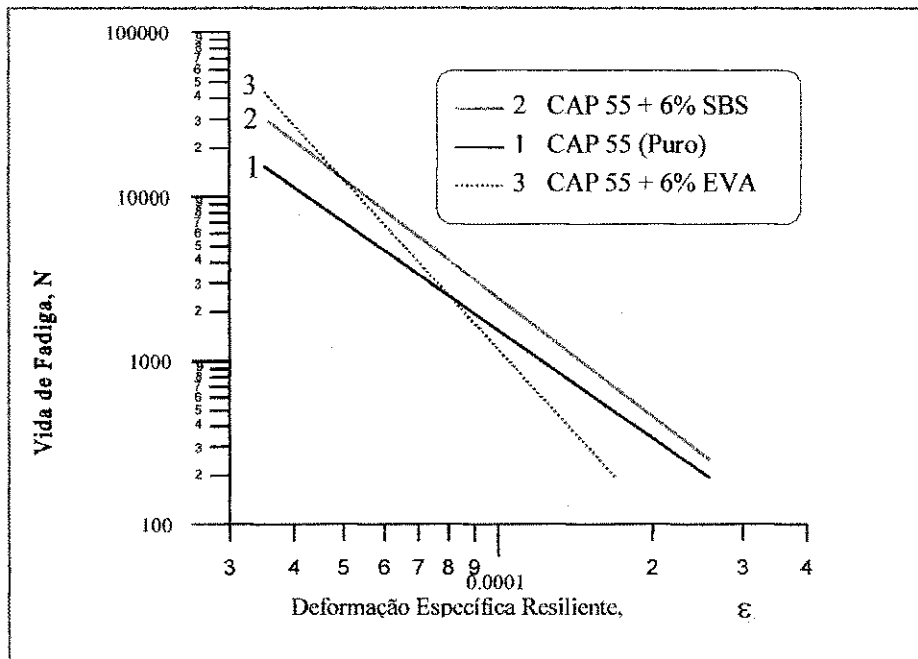


Figura. 2.5: Vida de fadiga (N) \times Deformação específica resiliente (ϵ)
(SALATHÉ et alii, 1992)

Então é interessante saber se realmente os polímeros melhoram o desempenho dos CAPs de modo que os CBUQs correspondentes também aumentem suas resistências às trincas de fadiga. Em trabalho de SANTANA & SALATHÉ (1990), com um dos objetivos de quantificar a resistência à fadiga realizou-se o chamado ensaio de fadiga à tensão controlada, submetendo vigotas de CBUQ (3,8 x 3,8 x 38,1 cm), a ciclos de carregamento à flexão, sendo duas vigotas utilizando asfalto polímero e três com asfalto puro. O que observou-se é que as misturas com asfalto polimerizado diminuiu o módulo de resiliência (MR) e aumentou a vida de fadiga.

CAPÍTULO - 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1) INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentado o programa experimental desenvolvido nesta pesquisa, abordando os aspectos relacionados a escolha, seleção, localização e preparação dos materiais, além de mostrar as metodologias e especificações utilizadas para caracterizar estes materiais.

O objetivo do estudo é a caracterização de misturas asfálticas empregando dois tipos de asfalto numa mistura semelhante de agregados, para verificar em laboratório a qualidade da mistura quando se utiliza um CAP polimerizado comparando-a com o comportamento da mesma composição de agregados empregando CAP puro.

3.2) ESCOLHA E COLETA DOS MATERIAIS

3.2.1) Agregado graúdo

Utilizou-se como agregado graúdo calcário calcítico, denominado nesta pesquisa de agregado não convencional. O critério utilizado para escolha desse agregado, foi tanto a oferta de grandes jazidas na região quanto também o preço bem inferior às britas graníticas, além de possuir geralmente propriedades satisfatórias no meio rodoviário. Sabe-se que a brita granítica possui um custo de extração bem mais elevado, além de grandes distâncias de suas jazidas até as usinas, onerando dessa forma o custo final do pavimento.

Portanto, há necessidade de sugerir alternativas de escolha materiais, britados ou não, que possa concorrer com o preço, além de possuir propriedades satisfatórias ao meio rodoviário. Embora considerada de qualidade inferior às rochas graníticas e gnaíssicas, os agregados calcários são amplamente utilizados em diversas partes do mundo na pavimentação, mesmo que às vezes não atendam a certas exigências adotadas nas especificações convencionais.

O agregado graúdo não convencional utilizado nesta pesquisa é proveniente de Alhandra/PB, onde foi coletado em depósito da companhia industrial de Gramame-

CIGRA, e posteriormente acondicionados em sacos de nylon de 50Kg no laboratório de solos da UFPB, para posterior britagem.

3.2.2) Agregado miúdo

O agregado miúdo escolhido, foi uma areia lavada de rio, por possuir qualidade satisfatória, e ser de uso corrente em obras de engenharia rodoviária da região. A areia é proveniente do Rio Paraíba, no município de Barra de Santana. Após coletada, a areia foi estocada em sacos de nylon.

3.2.3) Material de enchimento

O filer escolhido é originário de rocha calcária. O critério de escolha além da comprovada qualidade, foi o custo inferior aos seus similares, tais como cimento e cal hidratada. O pó calcário foi fornecido pela companhia industrial de Gramame-CIGRA, situada no município de Alhandra/PB, em sacos de 10 kg.

3.2.4) Cimento asfáltico

Foram empregados dois tipos de cimento asfáltico. Um puro (CAP50/60) proveniente da refinaria LUBNOR¹, conseguido junto a usina gravimétrica pertencente a Construtora Cojuda, localizada próximo a Sapé/PB; e um modificado com 6% de polímero tipo SBS fornecido pela Coperbo, localizada no município de Cabo/PE. Os dois foram acondicionados adequadamente em recipientes de 20 litros.

O tipo de asfalto utilizado na modificação com polímero, é também de penetração 50/60 e proveniente da refinaria LUBNOR, situada em Fortaleza/CE. Portanto, os dois tipos de CAP são de mesma origem.

3.3) PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

O material graúdo, o calcário, não chegou no tamanho e forma de agregado. As pedras calcárias empregadas para obtenção do agregado graúdo foram então reduzidas por impacto, com martelo de 5Kg, para facilitar a britagem devido a limitação da

¹ LUBNOR – Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste (Desde de 1997) - antes conhecida como ASFOR

abertura máxima permitida pelo britador utilizado. Após a britagem obteve-se uma “brita corrida” com um diâmetro máximo de 25,4mm.

Nenhum dos materiais utilizados sofreu qualquer processo de lavagem. Porém, antes de fazer a granulometria colocou-se em estufa a 105^oC para eliminar a umidade porventura existente, logo após fazendo o quarteamento e realizando a granulometria e demais ensaios.

Posteriormente à obtenção do agregado graúdo, este foi separado nas frações de acordo com a metodologia adotada para cada ensaio, e acondicionadas em sacos plásticos para posterior utilização. Este mesmo processo de preparação foi adotado para a areia.

O material de enchimento utilizado, filer de calcário, já se encontrava pronto para o uso com embalagem própria de comercialização, tendo-se somente o cuidado de ser colocado em local seco e arejado para evitar qualquer problema de absorção de umidade.

Os cimentos asfálticos (CAPs) utilizados, tanto o asfalto puro quanto o asfalto polimerizado foram acondicionados em recipientes metálicos e colocados em locais adequados no laboratório de asfalto, mantendo-os fechados de forma que não houvesse qualquer entrada de material que pudesse alterar o seu comportamento.

3.4) AJUSTAGEM GRANULOMÉTRICA - MISTURAS DOS AGREGADOS

Os agregados utilizados na mistura, foram estudados numa granulometria contínua e de graduação densa, sendo sua ajustagem granulométrica realizada através do método gráfico de Rothfuchs. Obteve-se uma indicação dos percentuais de cada agregado para a composição da mistura; neste estudo os percentuais encontrados foram: 76% de calcário, 20% de areia e 4% de filer. Esta indicação situou-se perfeitamente dentro da faixa escolhida, e utilizando-se o mesmo tipo de mistura de agregados nos dois tipos de dosagem (CAP puro e polimerizado).

As faixas granulométricas utilizadas para o estudo do asfalto polimerizado, foram as mesmas previstas pelos órgãos rodoviários para as misturas asfálticas convencionais.

A faixa granulométrica escolhida para enquadramento da mistura de agregados foi a “faixa B”, definida pelas especificações de serviços do DNER para concretos betuminosos usinados à quente, por permitir maior flexibilidade quanto ao uso de concretos betuminosos em camadas de ligação e rolamento. Vale lembrar que a faixa a ser usada, em um projeto real de pavimento, deve ser aquela na qual o diâmetro máximo seja igual ou inferior a 2/3 da espessura da camada.

A Tabela 3.1, apresenta a granulometria obtida para a mistura de agregado, bem como a faixa B do DNER.

Tabela 3.1: Ajustagem granulométrica

PENEIRAS (mm)	38,1	25,4	19,1	12,7	9,5	4,8	2,0	0,42	0,18	0,074
(%)	Porcentagem Passando, em Peso									
Faixa “B”	100	95-100	80-100	--	45-80	28-60	20-45	10-32	8-20	3-8
Ajustagem	100	98,5	89,4	--	56,7	43,8	36,6	28,0	9,6	6,9

Vale ressaltar que os limites extremos dos teores de CAP em peso (%) para a faixa “B” do DNER é de 4,5% à 7,5% (faixa indicada para camada de rolamento ou de ligação), como também o percentual mínimo de filer indicado para essa faixa é de 1,5%.

3.5) ESCOLHA DOS TEORES DE CAP A SEREM UTILIZADOS

A metodologia escolhida para moldagem dos corpos-de-prova, ou seja a dosagem do concreto betuminoso usinado à quente, foi o método Marshall (DNER-ME-43-64), comumente adotado pelos órgãos rodoviários no Brasil.

Segundo MOREIRA (1994), é de fundamental importância que os teores utilizados na confecção dos corpos-de-prova cubram um intervalo (faixa de percentual), onde as características físicas determinadas possam sofrer variações físicas para as misturas deste gênero, tornando assim mais fácil a identificação do “teor ótimo”.

Quando não se conhece bem o percentual ótimo através de experiência ou intervalo de variação de teores de CAP a utilizar nas moldagens de corpos-de-prova em laboratório, pode-se tomar como referência o “teor teórico” obtido da fórmula empírica e simplificada do Prof. Francês Maurice Duriez (equação 3.1), e distribuir num intervalo

de $\pm 1,5\%$ com variação de $0,5\%$ (ou seja: $-1,5\%$; $-1,0\%$; $-0,5\%$; Valor Teórico; $+0,5\%$; $+1,0\%$; $+1,5\%$).

$$P = K \sqrt[3]{2,5 + 1,3f} \quad ; \quad (3.1)$$

P = % de asfalto em relação ao peso total da mistura;

K = módulo de riqueza = 3,75 (varia de 3,5 à 4,0, para CBUQ em rodovias)

f = % da mistura de agregado passando na peneira 0,074mm, inclusive filer.

Nesta pesquisa, utilizou-se o conceito de M. Duriez, onde obteve-se o teor teórico correspondente à 6%. O intervalo de variação não foi seguido na íntegra, foram escolhidos os seguintes teores para moldagem dos corpos-de-prova Marshall: 5,0%; 5,5%; 6,0%; 6,5%; 7,0%, fazendo-se cinco determinações para cada teor.

3.6) MÉTODOS DE ENSAIOS

3.6.1) Introdução

Os métodos de ensaios utilizados na presente pesquisa, foram em sua maioria métodos propostos pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagens-DNER. Tanto os agregados quanto os ligantes utilizados, estão enquadrados nas especificações adotadas pelos órgãos rodoviários para as misturas asfálticas à quente convencionais.

Os agregados foram inicialmente selecionados pela granulometria em função da possibilidade de participarem ou não da composição da mistura de agregados. Posteriormente foram analisados em suas características físicas e mecânicas, de modo a atender as especificações vigentes.

Neste item serão apresentados todas as metodologias utilizadas tanto na caracterização dos agregados graúdo, miúdo e material de enchimento quanto a caracterização do ligante betuminoso e das misturas betuminosas, além de demais ensaios utilizados na sua complementação. Nas tabelas seguintes dos sub-itens 3.6.4 e 3.6.5 apresentam-se as especificações da dosagem Marshall (características recomendadas) e metodologias respectivamente, de forma resumida, bem como observações consideradas necessárias, para a análise dos resultados, de acordo com a metodologia empregada.

3.6.2) Sequência de dosagem

Uma dosagem de mistura betuminosa tipo CBUQ define:

- ⇒ composição da mistura;
- ⇒ curva granulométrica;
- ⇒ características físicas e mecânicas dos CAPs;
- ⇒ **teor ótimo de CAP.**

A composição da mistura compreende a distribuição percentual entre:

- ⇒ agregados graúdos;
- ⇒ agregados miúdos;
- ⇒ agregados finos (filer);
- ⇒ cimento asfáltico de petróleo-CAP

3.6.3) Parâmetros físicos e mecânicos da mistura asfáltica

Num corpo de prova, de uma mistura asfáltica, sabe-se que o asfalto está envolvendo as partículas do agregado e que os vazios estão disseminados no seio da mistura, porém esquematicamente, pode-se considerar que todos os componentes da mistura estejam separados como mostra a Figura 3.1.

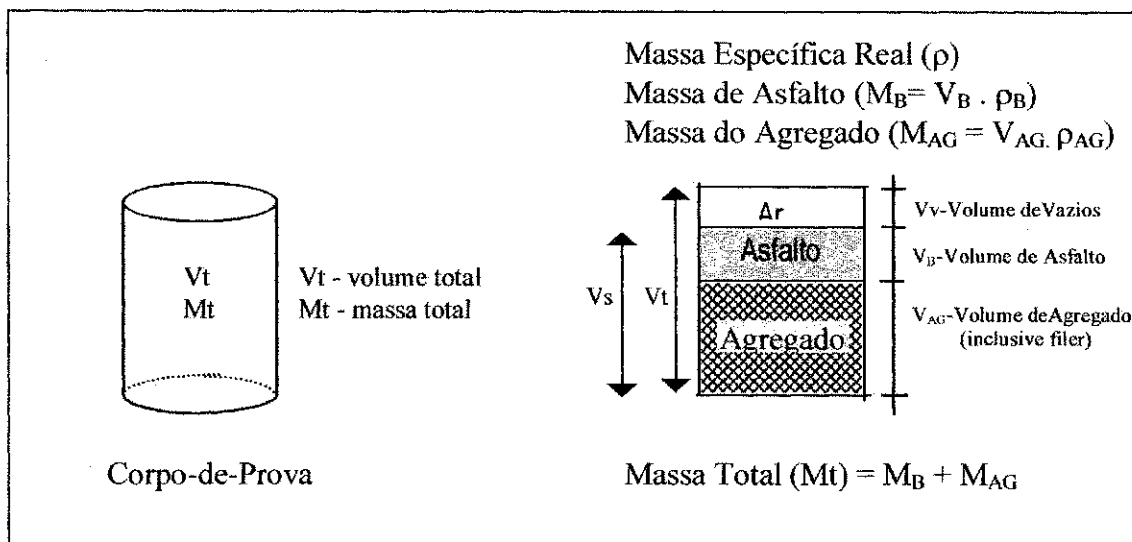


Figura 3.1: Esquema de um corpo-de-prova Marshall

Através do esquema mostrado na Figura 3.1 pode-se definir parâmetros de relação volumétrica e percentual que permitem estimar o comportamento de cada composição testada e escolher o melhor traço da mistura. Estes parâmetros estão indicados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros de mistura asfáltica volumétrica (massa e volume)

PARÂMETROS DA MISTURA ASFÁLTICA	UNIDADE	FÓRMULAS
Porcentagem de Vazios (vazios não preenchidos)	%	$V_v = \frac{V_v}{V_t} \times 100$
Porcentagem de Vazios no Agregado Mineral	%	$V_{AM} = \frac{V_v + V_B}{V_t} \times 100$
Relação Betume /Vazios (vazios preenchidos de asfalto)	%	$RBV = \frac{V_B}{V_B + V_v}$
Massa Específica Aparente	kg/m ³ ou g/cm ³	$d = \frac{M_t}{V_t}$
Massa Específica Máxima Teórica	kg/m ³ ou g/cm ³	$D = \frac{M_t}{V_t - V_v}$

3.6.4) Características recomendadas em uma dosagem (NBR-12891/1993)

As misturas de agregado e material betuminoso que compõem uma mistura tipo CBUQ devem atender aos parâmetros indicados nas Tabela 3.3 e 3.4.

Tabela 3.3¹: Parâmetros indicados para dosagem Marshall (NBR-12891/1993)

PARÂMETROS	CAMADA DE ROLAMENTO	CAMADA INTERMEDIÁRIA
Porcentagem de vazios-Vv (%)	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios-RBV (%)	75 a 82	65 a 72
Estabilidade mínima (kN):		
75 golpes (pressão de pneu 7 a 14 kgf/cm ²)	3,50	3,50
50 golpes (pressão de pneu até 7 kgf/cm ²)	2,50	2,50
Fluência: (1/10mm)	20 a 46	20 a 46
(1/100")	8 a 18	8 a 18

Tabela 3.4¹: Parâmetros indicados para dosagem (DNER – ME 043), nas misturas asfáltica com ligante modificado (DNER, 1998)

PARÂMETROS	CAMADA DE ROLAMENTO	CAMADA INTERMEDIÁRIA
Porcentagem de vazios-Vv (%)	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios-RBV (%)	75 a 82	65 a 72
Estabilidade mínima (kN):		
75 golpes (pressão de pneu 7 a 14 kgf/cm ²)	5,0	5,0
Fluência: (1/10mm)	20 a 45	20 a 45
(1/100")	8 a 18	8 a 18
Resistência à tração por compressão diametral a 25 ⁰ C (MPa)	0,70 a 1,20	0,70 a 1,20

¹ A diferença entre as especificações da dosagem Marshall com o ligante puro e polimerizado (tabelas 3.2 e 3.3) está somente na presença da especificação de resistência à tração indireta para as misturas com o CAP polímero.

3.6.5) Metodologia aplicada na pesquisa

As Tabelas 3.5 a 3.7 mostram a lista dos métodos de ensaios que foram utilizados na caracterização dos materiais envolvidos na pesquisa.

Tabela 3.5: Métodos de ensaios utilizados para os agregados

ENSAIOS	METODOLOGIA	OBSERVAÇÕES
Análise Granulométrica dos agregados	DNER - ME 83-94	Por peneiramento Com secagem em estufa
Massa específica real dos agregados: Graúdo Miúdo Material de enchimento	DNER - ME 81/94 DNER - ME 84/64 DNER - ME 85/94	Água destilada Querosene
Massa Espec. aparente do agregado graúdo	DNER - ME 81/94	
Absorção do agregado graúdo	DNER - ME 195/94	Mat. retido na # 2,0 mm
Índice de forma do agregado	DNER - ME 86/94	Faixa "C"
Resistência do agregado ao esmagamento	DNER - ME 197/94	Secagem ao Ar Mat. retido na # 2,4 mm
Avaliação da resistência mecânica do agregado pelo método de 10% de fino	DNER - ME 96/94	Secagem ao Ar
Desgaste do Agregado por Abrasão Máquina "Los Angeles"	DNER - ME 35/94	Secagem ao Ar Faixa "B"
Adesividade do Agregado Graúdo ao Ligante Betuminoso	DNER - ME 79/94	

Tabela 3.6: Métodos de ensaios utilizados para o cimento asfáltico

ENSAIOS	METODOLOGIA	OBSERVAÇÕES
Determinação da densidade, 20 ^o /4 ^o C	DNER ME 193/94	
Penetração dos materiais Betuminosos	IBP/ABNT MB - 107/1970	Finalidade de medir empiricamente a consistência do Cimento Asfáltico
Ponto de amolecimento (Anel e Bola)	IBP/ABNT MB - 247/94	Temperatura de indicação de mudança de consistência plástica/liquida
Ponto de fulgor	IBP/ABNT MB - 148/94	Temperatura na qual os vapores se inflamam
Viscosidade Saybolt-Furol	IBP/ABNT MB - 004/94	Mede de maneira prática a viscosidade
Ductibilidade	IBP/ABNT MB - 163/94	Finalidade de medir a elasticidade
Recuperação elástica	IBP/ABNT MB - 163/94	Finalidade de medir a elasticidade, através da recuperação elástica.

Tabela 3.7: Métodos de ensaios utilizados para misturas betuminosas

<i>ENSAIOS</i>	<i>METODOLOGIA</i>	<i>OBSERVAÇÕES</i>
Ensaio Marshall para misturas betuminosas	ABNT NBR – 043/64	Nº de golpes utilizados: 50/75 por face
Densidade aparente do corpo-de-prova de mistura betuminosa	ABNT NBR – 117/94	
Extração do ligante das misturas betuminosas	DNER - ME 53/94	Através da máq. Rotarex utilizou-se gasolina como solvente
Após a extração do ligante: Análise granulométrica Absorção Massa específica real Massa específica aparente	DNER - ME 83/94 DNER - ME 195/94 DNER - ME 81/94 DNER - ME 81/94	Via seca
Módulo de resiliência	DNER - ME 133/94	Utiliza-se os corpos-de-prova de cilindro Marshall
Tração por compressão diametral	DNER - ME 138/94	Utiliza-se os corpos-de-prova de cilindro Marshall

Com relação às temperaturas de aquecimento dos agregados, ligantes e de compactação utilizadas na dosagem Marshall, foram fixadas em função de resultados obtidos no gráfico de viscosidade (tempo × temperatura), ilustrados posteriormente na Figura 4.2. Para o asfalto polimerizado seguiu-se o mesmo procedimento além de consultar recomendações de trabalhos de outros pesquisadores e, também tomando como base especificações elaboradas pelo DNER (1998) para este tipo de ligante.

<i>Temperatura adotadas na dosagem Marshall</i>	<i>CAP50/60</i>	<i>CAP50/60 + Polímero</i>
→ temperatura de aquecimento do agregado (°C)	175	180
→ temperatura de aquecimento do ligante (°C)	165	170
→ temperatura de compressão (°C)	155	160

A faixa de temperatura de aquecimento do asfalto modificado pode variar de 165 a 180° C, conforme pesquisa no âmbito internacional e no país. Nas especificações recentemente elaboradas pelo DNER (1998) é citada a escolha em função do teor de polímero, ou seja, para o ligante puro é de 150° C acrescida de 3° C para cada 1% de polímero e na compactação de 140° C + 3° C / 1% de polímero, conforme já comentado.

Caso, tomasse como referência especificamente o procedimento do DNER (1998) para a determinação da temperatura de aquecimento do ligante polimerizado, apresentaria uma temperatura de aquecimento igual a $150 + 3 \times 6 = 168^{\circ}\text{C}$, já que possui 6% de polímero SBS adicionado ao ligante asfáltico.

3.6.6) Ensaio de compressão diametral para a determinação da resistência a tração estática

A determinação da resistência a tração indireta estática foi executado no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ em corpos-de-prova de misturas asfálticas preparadas de acordo com o estabelecido no método de ensaio DNER-ME 138/94.

Neste ensaio foi utilizada a prensa Marshall adaptada. Antes da execução do ensaio, os corpos-de-prova permaneceram durante pelo menos uma hora num sistema de refrigeração ambiente à temperatura de 25°C . Cada corpo-de-prova foi apoiado ao longo de suas geratrizes por dois frisos de carga posicionados na parte superior e inferior da amostra. A carga foi aplicada numa velocidade de $0,5\text{mm/s} \pm 0,1\text{mm/s}$ até atingir a ruptura, momento em que se fez a leitura do defletômetro no anel dinamométrico e a seguir calcula-se a carga de ruptura F , pela multiplicação da leitura do deflectômetro pela constante do anel dinamométrico da prensa utilizada.

A Figura 3.2 ilustra um corpo-de-prova Marshall com a indicação de aplicação de um carga de compressão F , capaz de romper o corpo-de-prova através de uma tensão de tração, que corresponde a resistência à tração estática do material (σ_t)

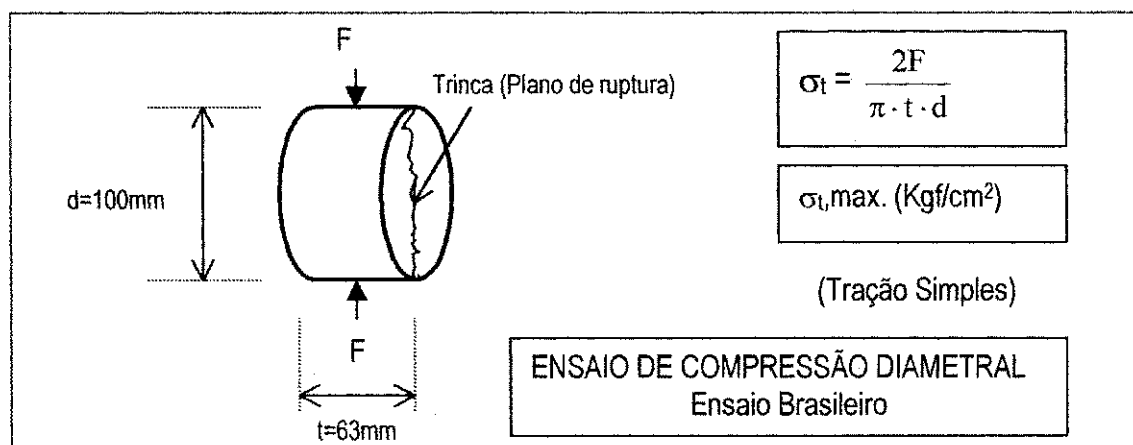


Figura 3.2: Ilustração do ensaio de tração por compressão diametral

3.6.7) Ensaio de módulo de resiliência

O ensaio de módulo resiliente foi executado no Laboratório de Misturas Asfálticas da COPPE/UFRJ segundo o método de ensaio DNER-ME 133/94. O módulo de resiliência determinado em ensaios de compressão diametral é obtido pela relação entre a tensão de tração normal ao plano diametral vertical e a correspondente deformação específica resiliente nesse plano.

Os ensaios foram realizados a uma temperatura média de 25^oC, após aproximadamente 50 aplicações da carga, com frequência de 1Hz., e um tempo de duração de carga de 0,1 segundo.

O cálculo do módulo resiliente foi feito através da fórmula:

$$MR = \frac{F}{\Delta \cdot t} (0,9976 \mu + 0,2692); \quad (3.1)$$

Onde: MR - módulo de resiliência em Kgf/cm²;

F- Carga aplicada diametralmente na amostra através do friso à geratriz do cilindro, Kgf;

Δ - deslocamento resiliente horizontal total, cm;

t - altura da amostra, cm;

μ - coeficiente de poisson.

3.6.8) Fluxograma da pesquisa

O fluxograma dos procedimentos utilizados está representado na Figura 3.3, onde mostra-se esquematicamente as sequências das atividades e ensaios desenvolvidos nesta pesquisa.

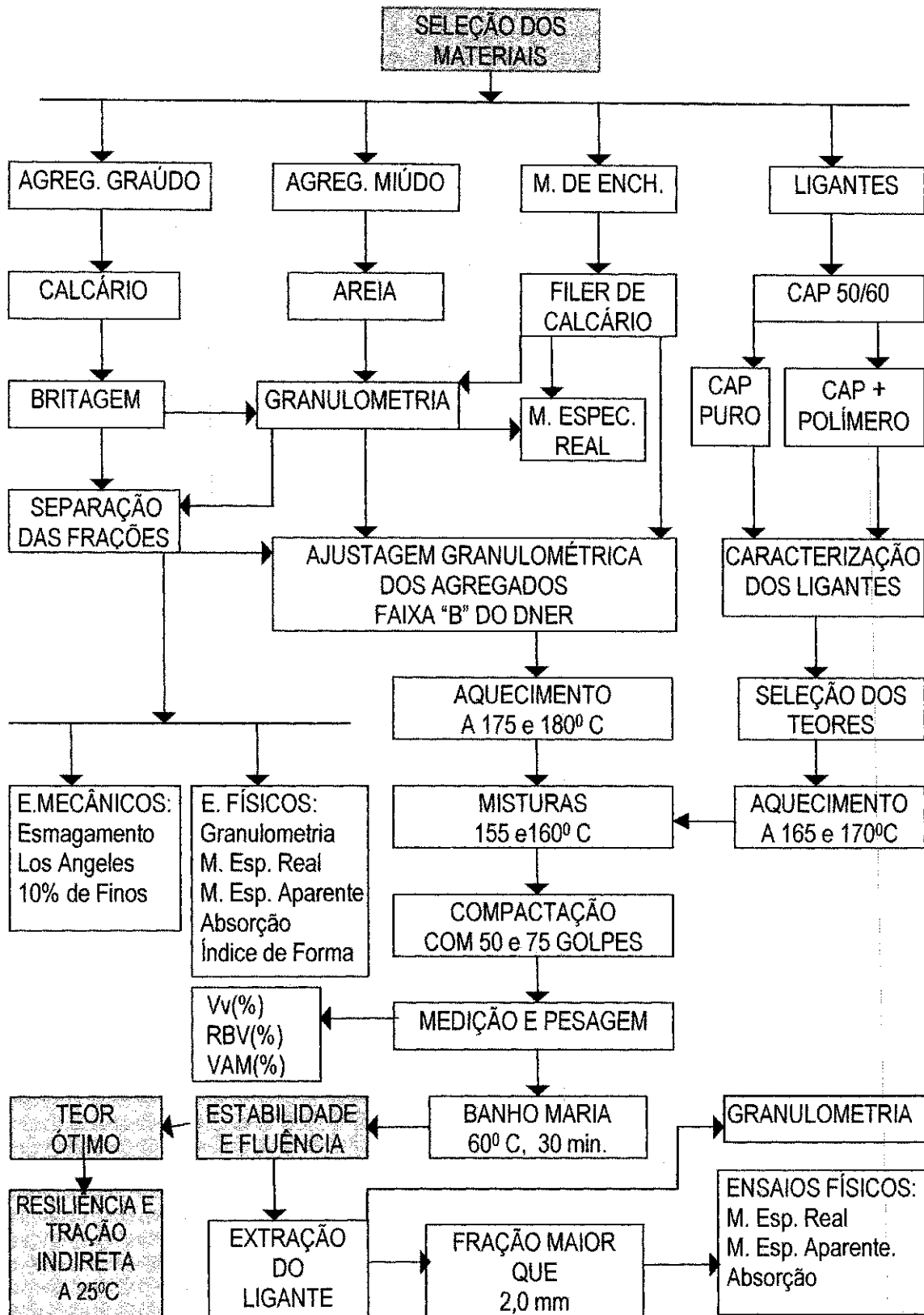


Figura 3.3: Fluxograma da pesquisa

CAPÍTULO – 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1) *INTRODUÇÃO*

No presente capítulo será feita a apresentação e análise dos resultados da pesquisa, baseado na metodologia exposta no capítulo anterior. Serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de caracterização, realizados com os materiais selecionados bem como os ensaios realizados nas misturas para a comparação entre os dois tipos de CAP.

Portanto, tendo como objetivo de estudo a caracterização de misturas asfálticas utilizando-se dois tipos de ligantes, CAP puro e CAP polimerizado. Confeccionando-se corpos-de-prova com o mesmo tipo de esqueleto mineral, ou seja, a mesma granulometria, mesmo tipo de agregado, mesmas condições de preparação, e variando apenas o tipo de ligante, com a finalidade de verificar em laboratório o comportamento das misturas com ligante puro e com polímero. Além de compactação com energias diferentes (50 e 75 golpes).

Também serão apresentadas considerações sobre resultados obtidos por outros pesquisadores.

A apresentação e discussão dos resultados terá a seguinte sequência:

- relatos e experiências de outros pesquisadores, além de especificações do agregado graúdo;
- características físicas e mecânicas dos agregados;
- avaliação comparativa do comportamento físico e mecânico do agregado graúdo (calcário) estudado antes e após a utilização do concreto asfáltico em dosagem Marshall;
- avaliação comparativa entre os dois tipos de CAP (puro e polimerizado) através de ensaios de caracterização mecânica das misturas em laboratório.

4.2) *GENERALIDADES DO AGREGADO GRAÚDO - CALCÁRIO*

Segundo MACÊDO (1989), com relação ao emprego dos calcários em obras rodoviárias, existem algumas técnicas desenvolvidas a partir de experiências práticas

verificadas na Argentina, França e África do Sul. De acordo com estas experiências é permitido o uso destes materiais com certa segurança com algumas precauções no processo de obtenção, beneficiamento, fabricação e aplicação.

Pelos resultados conseguidos em pesquisas específicas, para os agregados graúdos não convencionais na fabricação de concreto betuminoso à quente, têm-se notado que alguns parâmetros são semelhantes aos obtidos com agregados convencionais, e de mesma influência nas misturas betuminosas tais como: forma, textura, quantidade, tipo e granulometria.

Dentre as propriedades não comuns aos agregados graúdos convencionais e não convencionais, pode-se citar: absorção, degradação, resistência ao polimento e massa específica (BRASILEIRO, 1983).

Com relação a absorção, têm-se verificado que alguns tipos de agregados não convencionais apresentam alta absorção de água, o que influencia no consumo do cimento asfáltico, e até mesmo podendo causar erros no cálculo de vazios da mistura betuminosa em função do emprego inadequado das massas específicas (aparente e real) do agregado. Sabe-se que para a determinação do volume de vazios é necessário conhecer a densidade máxima teórica da mistura e, sua determinação tem sido obtidas através das densidades reais e/ou aparentes dos agregados e a densidade real do ligante. Entretanto, CASTRO NETO (1996) propõe um método de ensaio para determinar a densidade máxima teórica de misturas betuminosas de maneira direta. Conforme relato do mesmo, é fundamental saber a porcentagem de vazios nos projetos de misturas betuminosas, pois é um parâmetro que vem em muitos casos determinando o teor ótimo de ligante. Os outros parâmetros Marshall, em geral são verificados para atender as especificações.

Já quanto a propriedade de desagregação, são desaconselháveis o emprego de agregados graúdos que apresentam alto grau de desagregação, que é caracterizado pela desintegração do agregado na mistura betuminosa, quando submetido a esforços mecânicos produzidos pela compressão das camadas, pelo tráfego em serviço ou pelo atrito interno entre as partículas.

A propriedade de baixa resistência ao polimento de alguns agregados graúdos não convencionais se caracteriza pelo excessivo desgaste superficial dos revestimentos

betuminosos, provocado pela ação conjunta do tráfego e da água. Também os agregados graúdos que têm baixa massa específica não são recomendados a sua utilização em concretos betuminosos, em função do baixo valor de suporte verificado nas misturas.

Em estudos realizados por BRASILEIRO, LUCENA & ARAÚJO (1988), a absorção está relacionada com o volume e a quantidade de vazios permeáveis do agregado, como também fornece uma indicação aproximada da resistência mecânica deste. No caso do calcário, esta alta absorção pode estar relacionada ao microfissuramento superficial do agregado resultante do processo de britagem, e portanto podendo até mesmo influenciar na sua resistência.

4.3) ESPECIFICAÇÕES E EXPERIÊNCIAS REALIZADAS COM CALCÁRIO

Na pavimentação rodoviária, a Especificação brasileira normatizada pelo DNER, estabelece para o uso do agregado graúdo os seguintes limites: deverá apresentar desgaste máximo Los Angeles de 50% (CBUQ), deve apresentar boa adesividade ao ligante, índice de forma superior a 0,5, perda menor do que 12% no ensaio de durabilidade em 5 ciclos, e não estabelecendo nenhum limite para a absorção.

Enquanto que, no âmbito internacional a especificação japonesa além de limitar o valor de 30% no ensaio Los Angeles, considera que a absorção da água pelo agregado seja inferior a 3% e massa específica superior a 24,0 kN/m³. Como valor de desgaste, a França considera como de 20% enquanto que Espanha e Checoslováquia é de 35%, já nos Estados Unidos aceitam agregados com perda de 15 a 68% (COÊLHO, 1995).

De acordo com SOUZA (1980), a ASSHTO permite a utilização de agregados com porcentagem de desgaste Los Angeles acima de 50%, desde que a experiência tenha demonstrado seu bom comportamento.

Como ressalta BRASILEIRO (1983), não há consenso na adoção dos conceitos utilizados pelas especificações, com relação as características que devem apresentar os agregados graúdos na fabricação do concreto betuminoso à quente. O que se observa nas especificações é que não há uniformidade para a condição de aceitar ou rejeitar os agregados graúdos nas obras de concreto betuminoso à quente.

Guimarães (1987) apud MACÊDO (1989), afirma que de maneira geral em virtude de sua adesividade satisfatória, não existe objeção para o uso de rochas calcárias

britadas em obras de pavimentação, desde que apresentem resistência adequada ao tráfego esperado e que não sejam muito porosas.

Aqui no Brasil, sabe-se de aplicação de rochas calcárias em concreto asfáltico na execução do revestimento da BR-110, da cidade de Mossoró à Areia Branca, no Estado do Rio Grande do Norte, em forma de tratamento superficial duplo (TSD). Outro exemplo é a reforma para ampliação do Aeroporto da cidade de Dix-Sept Rosado (RN), utilizando como agregado graúdo o calcário em CBUQ, além do estacionamento do mesmo em forma de TSD.

Na Austrália, Netteberg (1971) & Visser (1984) apud COELHO (1995) afirmam ter conseguido qualidade satisfatória com agregados calcários com perda de 35% no ensaio Los Angeles e, para tráfego leve obtiveram também bons resultados com agregados que apresentam Los Angeles entre 40% e 50%. A mesma referência indica que na Nigéria, os agregados calcários não apresentam bom desempenho no revestimento do tipo tratamento superficial quando apresentavam resistência mecânica pelo ensaio 10% de fino entre 20 e 55 kN.

Segundo BIRMAM (1969), no estado do Rio de Janeiro, na maioria dos concretos asfálticos executados pelo D.E.R. utilizou-se agregados com desgaste superior a 55% não apresentavam defeitos relacionados ao desgaste por abrasão nestes revestimentos mesmo após 10 anos sob tráfego intenso e pesado. Para compensar a deficiência do alto desgaste, projetou-se uma mistura em proporções tais que os agregados graúdos fossem como que protegidos por uma argamassa de areia, filer e cimento asfáltico afim de que o atrito fosse diminuído.

BRASILEIRO (1983) e MACÊDO (1989), observaram que os agregados não convencionais (calcário e laterita) quando submetido ao ensaio de 10% de finos antes e após a imersão em água por 24 horas, apresentavam diminuição na resistência mecânica devido ao processo de saturação.

4.4) DESCRIÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS AGREGADOS

4.4.1) Introdução

Neste tópico, apresenta-se uma análise descritiva do comportamento das propriedades dos agregados: graúdo, miúdo e material de enchimento (filer de calcário), em função dos resultados obtidos na presente pesquisa, bem como comparações às especificações brasileiras (DNER) e internacionais.

4.4.2) Composição granulométrica dos agregados

As composições granulométricas dos agregados graúdo, miúdo e filer, bem como da mistura de agregados estão apresentados na Tabela 4.1, sendo estes resultados a média de 5 determinações, por via seca.

Observa-se que os agregados graúdo e miúdo apresentam baixa porcentagem de finos ($\phi < 0,074\text{mm}$). Devido ao percentual relativamente alto de filer (4%), a mistura final apresenta um valor considerável (6,9%) de material passando na peneira 0,074mm. Entretanto, essa porcentagem de finos contribui para o preenchimento de vazios e aumento da densidade na mistura de agregados. Sabe-se também que parte desse percentual de filer contribui para: melhorar a adesividade, aumentar a consistência e diminuir a suscetibilidade térmica do asfalto. Os diâmetros máximos da brita calcária e areia são 25,4mm e 2,0mm, respectivamente.

A granulometria da mistura, apresenta graduação contínua e bem graduada, preferida na pavimentação com o objetivo de evitar a segregação. Misturas desse tipo apresentam pequena porcentagem de vazios e boa resistência mecânica quando avaliada pelo ensaio de estabilidade Marshall.

Mas, novas tendências diverge quanto a essa pequena quantidade de vazios. Conforme apresenta MOTTA (1996) as especificações Superpave (programa SHRP) adota-se uma nova abordagem quanto a granulometria, optando-se pelo diagrama (gráfico) de potência 0.45 com **limites de controle e zona restrita**¹ para o desenvolvimento do projeto de estrutura de agregado (técnica para especificar a distribuição do tamanho dos agregados em uma mistura). Este gráfico especifica uma

¹ Está sobre a linha de densidade máxima entre as peneiras de tamanho (4,75 ou 2,36mm) e a de tamanho 0,3mm

granulometria de densidade máxima¹ (linha), que representa a granulometria em que os agregados se organizam da forma mais compacta possível. Esta granulometria deve ser evitada pois a distância entre os agregados (vazios) seriam tão pequena que não haveria espaço suficiente para formar um preenchimento (película) resistente de asfalto. Os pontos de controle funcionam como pontos mestres onde a curva deve passar. Enquanto a zona restrita forma uma região em que a granulometria não pode passar, é uma região que indica a presença de muita areia fina em relação a areia total. As misturas com granulometria dentro da região restrita geralmente apresentam comportamento frágil, dificultando a compactação e oferecendo pouca resistência à deformação permanente durante a vida útil.

O projeto de mistura de agregado mineral pelo Superpave, assegura que os agregados formarão um esqueleto mineral adequado, que possua forte resistência a deformação permanente, garantindo um teor de vazios adequado tal que favoreça a durabilidade da mistura.

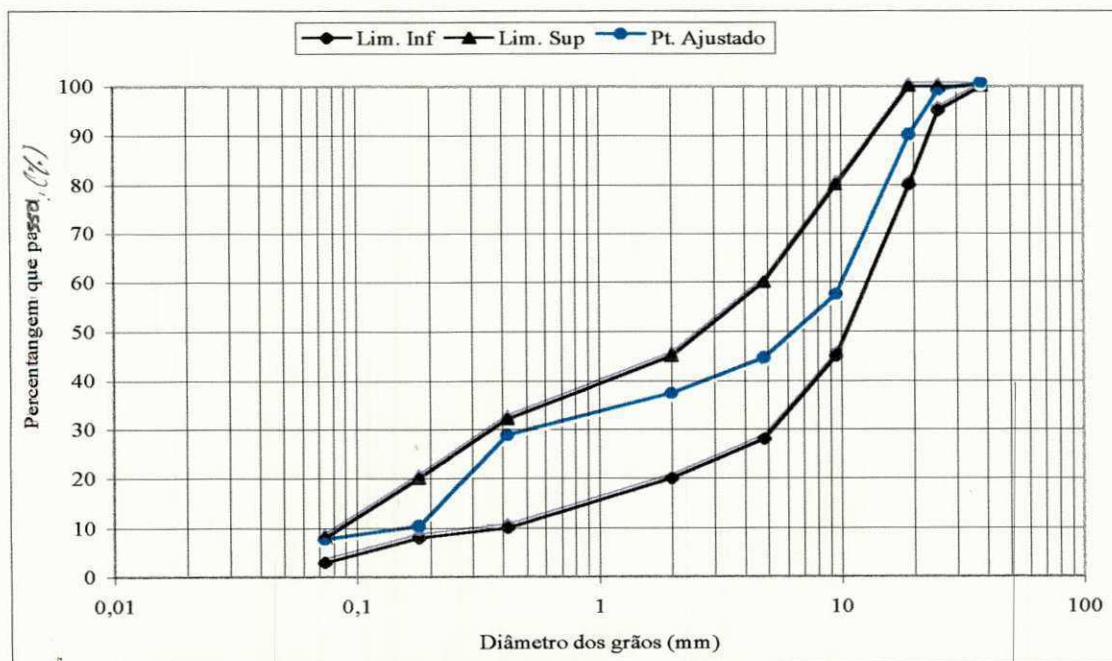


Figura. 4.1: Distribuição granulométrica adotada na mistura asfáltica estudada neste trabalho (Faixa B do DNER)

¹ A linha de densidade máxima (granulometria) é marcada a partir do agregado que passa 100% na peneira de tamanho máximo até a origem do gráfico.

- O tamanho máximo do agregado é definido como um tamanho maior do que o tamanho nominal máximo;
- O tamanho nominal máximo é definido como o tamanho maior que o primeiro tamanho que retém mais de 10%.

Tabela 4.1: Granulometria dos agregados utilizados nesta pesquisa e sua ajustagem

AJUSTAGEM GRANULOMÉTRICA (% passando)									
Peneiras (mm)	CALCÁRIO		AREIA		FILER		FAIXA B (DNER)	PONTO MÉDIO	COMBIN. ORIGINAL
	GRAN.	76%	GRAN.	20%	GRAN.	4%			
38,1	100	76,0	100	20,0	100	4,0	100	100	100
25,4	98	74,5	100	20,0	100	4,0	95 - 100	97,5	98,5
19,1	86	65,4	100	20,0	100	4,0	80 - 100	90,0	89,4
12,7	--	--	--	--	--	--	--	--	--
9,5	43	32,7	100	20,0	100	4,0	45 - 80	62,5	56,7
4,8	26	19,8	100	20,0	100	4,0	28 - 60	44,0	43,8
2,0	17	12,9	99	19,7	100	4,0	20 - 45	32,5	36,6
0,42	11	8,4	78	15,6	100	4,0	10 - 32	21,0	28,0
0,18	5	3,8	9	1,8	99	4,0	8 - 20	14,0	9,6
0,074	4	3,0	1,4	0,3	91	3,6	3 - 8	5,5	6,9

4.4.3) Massa específica real e aparente dos agregados graúdo, miúdo e material de enchimento

A massa específica representa parâmetro importante a ser analisado, dado que depende dos minerais constituintes do agregado e também da quantidade de vazios presentes. A finalidade principal da determinação da massa específica real é o cálculo da densidade teórica de misturas betuminosas, enquanto a massa específica aparente de um agregado é necessária para a transformação de unidades gravimétricas em volumétricas e vice-versa.

O ensaio de massa específica no Brasil é normatizado pelo DNER, contudo não especifica limitações quanto ao seu uso, apenas faz recomendações de que não deverá usar um valor baixo. Já outros países especificam um valor mínimo para o agregado graúdo. O Japão por exemplo, limita o valor mínimo de $24,5 \text{ kN/m}^3$, para uma massa específica real de agregados graúdo empregados em CBUQ. Portanto o valor encontrado nesta pesquisa para a massa específica real do agregado graúdo ($24,5 \text{ kN}$), Tabela 4.2, atende à esta especificação.

A massa específica aparente, depende dos minerais presentes e também relaciona-se com os vazios permeáveis do agregado. Nesta pesquisa obteve-se como resultado médio o valor de $22,1 \text{ kN/m}^3$, abaixo de sua massa específica real, em função da grande quantidade de vazios permeáveis devido sua alta absorção.

O agregado miúdo (areia), apresenta massa específica real média de $26,4 \text{ kN/m}^3$, valor coerente com outros estudos de material da mesma região, ou seja, areia com natureza de constituição basicamente de partículas de quartzo. A massa específica real do material de enchimento (filer de calcário), foi de $25,4 \text{ kN/m}^3$ (Tabela 4.2).

4.4.4) Ensaio de absorção

A absorção de água pelo agregado é uma das características importantes na medida que, em geral, o agregado de alta absorção está associado à baixa resistência mecânica, assim como a porosidade afeta a quantidade de ligante requerida pela mistura betuminosa.

Na Inglaterra O'Flatherty (1974) apud MACÊDO (1989), considera que o valor da absorção d'água permitida para agregados a serem utilizados em rodovias deve ser

limitada em 2% para os revestimentos asfálticos. Já a especificação Japonesa, limita em 3% para agregado graúdo, enquanto que a África do Sul além de limitar em 1% para o agregado graúdo também limita em 1,5% para o agregado miúdo. No Brasil as especificações do DNER, não estabelecem limites de aceitação para a absorção de agregados, apenas recomendam que seu valor não deve ser alto, ficando portanto a critério do projetista aceitar ou não um valor alto, pois sabe-se que esta indicação do DNER é bastante subjetiva e sem referencial.

O valor determinado para a absorção do agregado empregado para este estudo foi de 7,5%, valor coerente com valores determinados por outros pesquisadores para o mesmo tipo de material, porém indicando que a amostra estudada apresenta quantidade acentuada de vazios permeáveis, este valor não atende às especificações de outros países citadas anteriormente, porém sabe-se de experiências Japonesas utilizando brita calcária em concreto betuminoso com absorção de até 9% e com desempenho satisfatório em serviço. De acordo com COELHO (1995), têm-se verificado na literatura, que absorção dos calcários varia de 0,3 à 12%, isso dependendo de sua era de formação.

4.4.5) Índice de forma do agregado

Em relação ao formato do agregado será tanto melhor quanto mais cúbica for a sua forma. Portanto a forma considerada ideal para o agregado é a cúbica e com textura rugosa, o que possibilita um maior entrosamento entre as partículas e conseqüentemente maior resistência ao cisalhamento. Sendo importante para o desempenho do agregado na mistura a percentagem de agregados com duas ou mais faces britadas. O índice de forma(f) varia de 0 a 1 e depende do tipo de rocha e do tipo de britador utilizado. Quando $f=1$ o agregado possui ótima cubicidade e, quando $f=0$, possui forma lamelar. Ou seja, é um agregado lamelar quando este índice tende a 0 (zero), e a ser cúbica quando se aproximar de 1 (um). Segundo BAUER (1995) quanto maior este fator melhor é a estabilidade dada pelo agregado na mistura.

De acordo com a Tabela 4.2, o valor encontrado no fator de cubicidade ($f=0,82$) é superior ao valor mínimo especificado pelo DNER, que é maior ou igual a 0,5 e, portanto um valor aceitável em termos de forma. Este fator de cubicidade pode ter bastante influência na estabilidade e na homogeneidade das misturas.

4.4.6) Ensaio de desgaste por abrasão (Los Angeles)

O ensaio de abrasão Los Angeles é um ensaio de durabilidade, que mede a dureza do material, ou seja, a sua capacidade de resistir à abrasão e à degradação. O resultado do ensaio é avaliado pela perda de material em relação à massa inicial da amostra, expressa em percentual de desgaste. O ensaio combina o atrito e a abrasão, ou seja procura reproduzir o desgaste que o agregado irá sofrer na estrutura betuminosa pela ação do tráfego ou pelo atrito interno entre as partículas.

No Brasil, os valores permitidos para a porcentagem de desgaste são estabelecidos pelas especificações do DNER, e dependem do tipo de serviço considerado. Para o concreto betuminoso usinado à quente tradicional, o valor máximo é de 50%. Já nas especificações de serviços de pavimentação de asfalto modificado por polímero, o DNER (1998) estabelece um desgaste igual ou inferior a 55% (DNER-ME 035); embora aceite agregados com desgastes superiores a esta especificação, desde que tenha apresentado desempenho satisfatório em utilizações anteriores.

Nesta pesquisa observou-se mudança de comportamento quanto a perda por abrasão dos agregados quando submetidos ou não a secagem prévia em estufa. O valor encontrado sem a secagem em estufa, 52%, atende apenas a especificação do asfalto polimerizado estabelecida pelo DNER (1998). Entretanto, houve uma diminuição significativa quando o agregado foi previamente seco em estufa (105^oC/24h), encontrando-se um valor de 42%. Neste caso, atende-se ao limite máximo estabelecido para serviço tipo CBUQ.

4.4.7) Ensaio de esmagamento

É também um ensaio de durabilidade que têm por objetivo determinar a resistência de um agregado ao esmagamento. O ensaio procura reproduzir o comportamento do agregado em serviço quando submetido aos esforços dos rolos durante a compactação e ao carregamento repetido provocado pelo tráfego. Conforme relata MACÊDO (1989) o valor da resistência ao esmagamento varia de 90% para agregados excepcionalmente resistentes, a 65% para agregados inaceitáveis. O'Flaherty (1974), sugere que agregados com resistência ao esmagamento menores que 65% são muito fracos.

O DNER, exige que o agregado graúdo que será utilizado em concreto asfáltico deverá apresentar os seguintes valores para a sua resistência ao esmagamento: 65% para o concreto sujeito ao desgaste superficial e, 55% para outros concretos.

O valor encontrado nesta pesquisa para resistência ao esmagamento foi 68,5%, considerado aceitável em termos de resistência mecânica para a pavimentação, de acordo com as especificações do DNER.

A Tabela 4.2, apresenta-se os resultados encontrados nesta pesquisa para os ensaios físicos e mecânicos realizados com os agregados empregados na mistura betuminosa.

Tabela 4.2: Características físicas e mecânicas dos agregados

Tipos de Agregados	PROPRIEDADES DOS AGREGADOS							
	δ aparente (KN/m ³)	δ real (KN/m ³)	Absorção (%)	Índice de forma	Los Ang. (%)	Resistência Esmag. (%)	10% de Fino (kN)	Adesiv.
Calcário	22,0	24,5	7,50	0,83	52 42*	68,5 67,0*	43 65*	Satisf.
Areia	--	26,4	--	--	--	--	--	--
Filer	--	25,4	--	--	--	--	--	--

NOTA: δ = Massa Específica

*Valores com secagem prévia em estufa à 105^o/24h

4.4.8) Ensaio de 10% de Finos

É um ensaio de durabilidade que tem como objetivo determinar a carga mínima de esmagamento necessária para produzir 10% de finos. Este ensaio procura descrever o comportamento do agregado em serviço quando submetido aos esforços dos rolos durante a compactação

Embora sendo um ensaio normatizado pelo DNER, não existe especificações no Brasil. Entretanto, existem especificações internacionais para o mesmo, como por exemplo a B. S. 882-73, que estabelece os valores mínimos de: 100kN para agregados que sejam usados em concretos resistentes e sujeitos a desgaste superficial, e 50kN para outros concretos.

Os resultados obtidos para a resistência mecânica do agregado calcário avaliada pelo método de 10% de finos, parecem influenciados quanto ao modo de preparação com relação a secagem prévia em estufa (105^oC/24h), apresentando mudança de comportamento através do aumento significativo no valor encontrado após a secagem

em estufa, ou seja passando de 43 para 65kN, o que atende a especificação britânica referida anteriormente.

4.4.9) Adesividade do agregado ao ligante betuminoso

Uma das qualidades essenciais exigidas de um agregado a ser usado em revestimentos asfálticos é que tenha boa adesividade, isto é, não haja possibilidade de deslocamento da película betuminosa pela ação da água. Portanto, as propriedades de superfície dos agregados têm interesse especial na caso de misturas betuminosas, já que a função principal de um ligante betuminoso é de aderir às partículas dos agregados, e sabendo-se que a adesividade é um fenômeno superficial que depende do estreito contato entre os dois materiais e a mútua atração de suas superfícies.

Em geral, os agregados básicos ou eletropositivos (calcários, basaltos) apresentam maior adesividade do que os ácidos ou eletronegativos (granitos, gnaisse). Porém NEDER et alii (1996), relatam que a maior desvantagem dos agregados como o calcário é que a superfície das partículas pode se tornar polida com o passar do tráfego, contribuindo para a diminuição do atrito interno entre as partículas e conseqüentemente redução da resistência ao cisalhamento com o passar do tempo. Enquanto os agregados silicosos (ácidos) são pouco sensíveis ao polimento.

O que se tem verificado é que outros fatores como a textura superficial, porosidade e propriedades de absorção afetam a aderência. Superfícies muito lisas não aderem os materiais asfálticos tão bem quanto as rugosas, como também superfícies porosas tendem a ter uma ancoragem melhor que as superfícies de baixa porosidade.

O resultado encontrado para os agregados neste estudo foi satisfatório, tanto para o CAP puro quanto para o CAP polimerizado, resultado já esperado em razão do agregado usado ser básico, além de possuir também uma alta absorção que favorece a retenção (ancoragem) do ligante.

4.4.10) Resultados obtidos após a extração do ligante

Com a finalidade de verificação do real teor de asfalto contido em cada corpo-de-prova, realizou-se a extração do ligante pelo Rotarex. Os dados obtidos parecem indicar uma redução nos valores dos teores de ligante após a extração em relação aos moldados previamente, provavelmente devido à absorção do ligante pelo agregado graúdo. Dois valores encontrados (Tabela 4.3) apresentaram ligeiro acréscimo em relação aos teores iniciais utilizados na moldagem¹, provavelmente devido ao carreamento de finos durante a extração do ligante associados aos erros inerentes na realização do ensaio de extração empregado nesta pesquisa.

Em relação à massa específica real do agregado graúdo encontrada após a extração do ligante, verificou-se que houve uma ligeira redução em relação ao agregado original (24,5 kN/m³), conforme mostra os resultados da Tabela 4.4, evidenciando que houve uma penetração do ligante nos poros permeáveis. Já a massa específica aparente não apresentou alterações significativas, ficando seu valor médio de 21,7 a 22,4 kN/m³ (Tabela 4.5) praticamente igual ao de antes da moldagem (22 kN/m³).

A propriedade mais afetada após a extração do ligante foi a absorção, que apresentou uma redução significativa em relação ao determinado antes da moldagem (7,5%). Os valores encontrados variam de 2 a 5% conforme indica Tabela 4.6. Esta redução ocorre provavelmente devido ao preenchimento dos poros ou vazios permeáveis pelos finos ou ligante, tornando-o mais impermeável.

Analisando-se essas propriedades com relação aos dois tipos de ligantes, verifica-se que há um ligeiro aumento da absorção e na massa específica real para o ligante polimerizado, possivelmente isso ocorre em função de sua maior viscosidade, tendo-se assim, maior dificuldade na penetração dos vazios permeáveis. Porém, isto somente fica bem caracterizado na energia de 75 golpes. Quanto a granulometria obtida após a extração do ligante (para 50 e 75 golpes), observou-se uma ligeira diminuição da mesma, porém ainda enquadrando-se dentro da faixa pré estabelecida (Tabela 4.7). Redução verificada através da comparação dos resultados entre as Tabelas 4.1 e 4.7,

¹ Verificados nos seguintes teores (tabela 4.3): 5,5% - após a extração 5,6%
6,0% - após a extração 6,2%

embora sabendo-se de que é difícil comparar, em função possuir uma dispersão na própria montagem dos corpos de prova. A figura 4.2 ilustra uma comparação da amostra que apresentou maior degradação em relação a granulometria original.

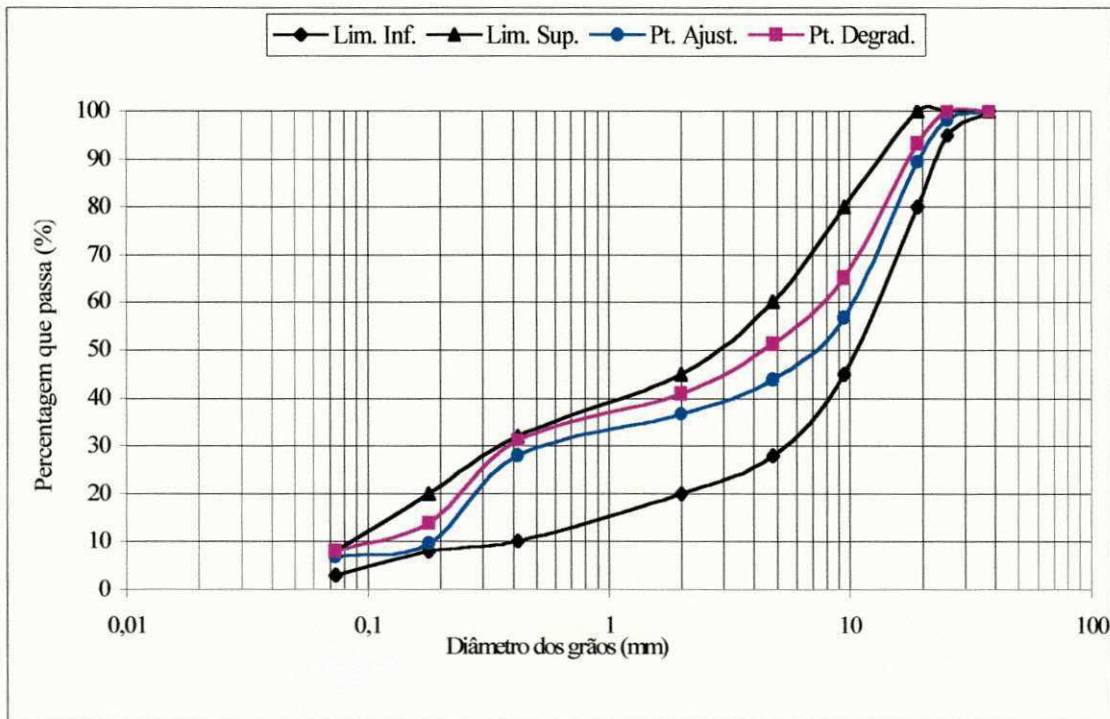


Figura 4.2: Análise granulométrica após a extração do ligante (Amostra de maior degradação - 6% CAP+Polímero, em energia de 75 golpes)

Tabela 4.3: Verificação do teor de ligante após a extração pela máquina rotarex

Propriedade	Extração do ligante (%)									
	50 Golpes por face					75 Golpes por face				
Teor de ligante adicionado	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Teor de ligante	Após a extração do ligante									
CAP+Polímero	4,8	5,6	6,2	6,3	6,9	4,5	5,2	6,0	6,4	6,3
CAP Puro	4,7	5,2	5,7	6,3	6,6	4,5	5,7	6,2	6,3	7,0

Tabela 4.4: Massa específica real do agregado graúdo após a extração do ligante

Propriedade	Massa específica real (Kn/m ³)									
Compactação	50 Golpes por face					75 Golpes por face				
Teor de ligante	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Massa específica	Valores obtidos após a extração do ligante									
CAP+Polímero	24,9	24,2	24,2	24,2	23,1	23,3	24,3	24,2	24,7	24,0
CAP Puro	24,4	24,5	24,2	24,0	23,8	24,6	23,0	23,1	23,6	23,1

Tabela 4.5: Massa específica aparente do agregado graúdo após a extração do ligante

Propriedade	Massa específica aparente (kN/m ³)									
Compactação	50 Golpes por face					75 Golpes por face				
Teor de ligante	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Massa específica	Valores obtidos após a extração do ligante									
CAP+Polímero	22,2	22,0	22,1	22,2	21,9	21,7	21,9	22,2	21,9	21,9
CAP Puro	22,0	22,1	22,1	22,0	22,0	21,9	21,7	22,0	22,4	21,9

Tabela 4.6: Absorção do agregado graúdo após a extração do ligante

Propriedade	Absorção (%)									
Compactação	50 Golpes por face					75 golpes por face				
Teor de ligante	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Absorção	Valores obtidos após a extração do ligante									
CAP+Polímero	5,0	4,0	4,0	3,0	3,0	3,0	4,5	4,0	5,0	3,0
CAP Puro	4,8	4,5	3,5	3,5	3,4	4,8	3,0	2,0	2,0	2,3

Tabela 4.7: Granulometria após a extração do ligante, para a energia de compactação de 75 golpes por face

GRANULOMETRIA APÓS EXTRAÇÃO DO LIGANTE, P/75 GOLPES												
Tipo de ligante	CAP + POLÍMERO					CAP PURO					Faixa B do DNER	COMBIN. ORIGINAL
Teor de ligante(%)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0		
Peneiras	Percentual passando					Percentual passando						
38,1mm	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
25,4mm	98,9	100	100	100	100	99,4	99,0	100	100	100	95-100	98,5
19,1mm	95,5	92,2	93,3	93,3	90,4	93,4	94,3	92,4	94,9	94,6	80-100	89,4
12,7mm	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
9,5mm	68,4	62,2	65,3	64,0	58,5	58,5	66,6	65,4	63,2	63,0	45-80	56,7
4,8mm	52,5	47,6	51,2	48,7	46,9	48,5	49,4	48,3	47,8	47,0	28-60	43,8
2,0mm	39,9	37,2	40,9	37,5	37,9	36,7	38,1	38,2	36,7	38,2	20-45	36,6
0,42mm	28,4	25,2	31,2	25,0	28,5	25,7	26,5	27,0	26,8	26,8	10-32	28,0
0,18mm	10,9	8,6	13,8	11,0	11,7	10	11,4	10,4	10,7	10,1	8-20	9,6
0,074mm	6,6	5,1	8,0	7,2	7,7	6,4	8,0	7,0	7,1	7,4	3-8	6,9

4.4.11) Considerações gerais sobre o comportamento do agregado

Sabe-se que para a escolha e a utilização de um agregado deve-se levar em conta além das exigências em relação à jazida e à granulometria, também requisitos a serem atendidos no que concerne à qualidade do agregado. Entende-se como “qualidade”, o resultado da determinação das propriedades físicas, químicas e mecânicas do agregado e sua comparação com padrões estabelecidos, que juntamente com a granulometria indica se o agregado é ou não adequado ao uso rodoviário.

Os resultados encontrados, atendem na sua maioria, às especificações do DNER bem como algumas normas internacionais, e indicam que os agregados calcários atendem às condições de uso no meio rodoviário, porém é necessário uma maior atenção às propriedades consideradas deficientes, como por exemplo a absorção. Qualquer mal cobertura da partícula com o ligante provoca uma alta absorção de água e portanto afeta a sua resistência mecânica (ao desgaste). Entretanto este aspecto é de maior importância nos países (regiões) que apresentam clima com inverno rigoroso e possibilidade de geadas.

A Tabela 4.8 apresenta indicações de propriedades de alguns tipos de rochas utilizadas para a fabricação de agregados empregados em construções rodoviária.

Tabela 4.8: Propriedades de agregados empregados na construção rodoviária

REFERÊNCIA	ROCHAS P/ AGREGADOS	PROPRIEDADES						
		Los Angeles (%)	Adesividade	Índice de Forma	Massa Específica (KN/m ³)	Absorção de Água (%)	Resistência à Compressão (KPa)	Resistência ao Intemp.
SENÇO (1997)	Granito	-	-	-	26,60	< 0,5	15,0	Boa
	Calcário	-	-	-	Variável	Muito Variável	Variável	Boa
	Basalto	-	-	-	30,00	< 1,0	20,0	20,0
BRASILEIRO (1983)	Granito	19,6	NS	0,79	27,3	0,7	ND	ND
	Calcário(JP) ¹	42,9	S	0,83	26,7	6,0	ND	ND
	Seixo Britado	66,4	NS	0,88	26,9	1,2	ND	ND
	Laterita(JP) ¹	64,2	S	0,94	30,8	9,4	ND	ND

NOTA: S = satisfatório NS = não satisfatório ND = não determinado

¹ Calcário e Laterita pertencentes à jazidas localizadas em João Pessoa/PB

4.5) AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO DO CAP PURO E CAP MODIFICADO

4.5.1) Análise comparativa nas propriedades de caracterização entre os dois tipos de CAP

De acordo com a literatura consultada, espera-se que o asfalto modificado apresente um comportamento melhor na maioria de suas propriedades, ou seja que apresente um melhor desempenho em relação ao ligante não modificado.

A adição do polímero elastômero-termoplástico SBS ao CAP conduz a um novo material betuminoso que apresenta característica ou comportamento diferente do CAP puro, observado através da modificação de suas propriedades físicas, tais como: elevação do ponto de amolecimento, diminuição da suscetibilidade térmica além do aumento da recuperação elástica o que evidencia mudança no comportamento através da presença do SBS no ligante (Tabelas 4.9 e 4.10).

Analisando os resultados obtidos neste estudo (Tabela 4.9), evidencia-se uma melhora nas propriedades do ligante modificado com relação ao não modificado, como por exemplo, características elásticas acentuadas observadas nos ensaios de recuperação elástica (Tabela 4.10 e Figura 4.3), como também uma redução da suscetibilidade térmica (S.T.) analisada através do acréscimo do índice de suscetibilidade térmica, obtidas pela equação de Pfeiffer e Van Doormaal que é adotada no Brasil para caracterizar a suscetibilidade térmica de asfaltos. Porém, a pesquisa de asfalto modificado por polímero (DNER, 1998), mostra que as hipóteses de Pfeiffer e Van Doormaal não são adequadas para o asfalto polímero, em função da temperatura do ponto de amolecimento ser muito diferente da temperatura cuja penetração é 800 (0,1mm). Sugere-se então para esse tipo ligante, que o índice de suscetibilidade térmica seja determinado a partir da inclinação da reta de penetração \times temperatura, para temperaturas de 15, 25 e 35^o C. Neste estudo não foi adotado a metodologia indicada pelo DNER, e sim através da fórmula empírica de Pfeiffer e Vam Doormaal, utilizando-se um único ponto da penetração (25^oC) e um outro da viscosidade Saybolt-Furol (135^oC).

Quanto à consistência, verificou-se porém um ligeiro aumento na penetração do asfalto modificado, porém dentro do intervalo especificado para asfalto modificado com

polímero tipo SBS (45/90) elaborado recentemente pelo DNER (1998). Este aumento analisado na penetração, contradiz ao observado na literatura, que indica menor penetração e conseqüentemente uma maior consistência. Porém sabe-se que o ensaio de penetração analisado de forma isolado não dá para definir a sua consistência. O aumento de consistência do AMP foi verificado através do ensaio de viscosidade Saybolt Furol a 135^o C, que passou de 290s (CAP puro) para 503s (CAP modificado).

O aumento da consistência no asfalto modificado, é também ratificado através do aumento do teor ótimo de ligante para os dois tipos de compactações (50 e 75 golpes), ou seja, um acréscimo de 0,5% no teor ótimo em ambas energias. Sabe-se que o teor ótimo de CAP de uma mistura asfáltica cresce quando aumenta a consistência do ligante, ou seja, aumenta o consumo do CAP se ele for mais consistente. Este fato foi observado nesta pesquisa.

Ensaio de caracterização do ligante polimerizado como recuperação elástica, penetração, ponto de fulgor e espuma, além de outros mostraram-se plenamente satisfatórios, atendendo às especificações de asfalto polímero elaboradas pelo DNER (1998). A única exceção foi o ensaio de ductibilidade com valor de 63,5cm (Tabela 4.9), menor que o especificado pelo DNER (1998) para AMP (≥ 100). Parecendo indicar uma limitação na referida especificação, uma vez que a tendência do asfalto polímero é apresentar ductibilidade inferior ao CAP puro, compensando o aumento do retorno elástico conferido ao CAP pela adição do polímero.

Parâmetro que notadamente merece destaque e comentários é a propriedade de elasticidade do ligante modificado. Verificou-se um valor bem acentuado no ensaio de recuperação elástica igual a 92%, enquanto o convencional apresentou apenas 14,5% após 1 (uma) hora a 10^oC. Analisando este valor para o asfalto modificado conforme as classes estabelecidas por SALATHÉ et alii (1992), é um valor que se enquadra na classe “S” (> 80% de RE), ou seja, definido portanto como um ligante em que suas propriedades elásticas aumentam com a temperatura, e cuja suscetibilidade térmica foi modificada. Entretanto, segundo SALATHÉ (1992) não tem sentido falar que um ligante tenha sido modificado quando o valor de recuperação elástica for menor que 40%.

O procedimento que mais tem sido adotado para verificar o comportamento dos asfaltos modificados é o baseado no ensaio de recuperação elástica. Os resultados obtidos com o emprego desse método permitiram verificar as diferenças existentes nas misturas empregadas neste estudo. Esses resultados, traduzidos em percentagem da recuperação elástica, são uma indicação do nível de elasticidade do material.

Tabela 4.9¹: Propriedades de caracterização dos ligantes

PROPRIEDADES	UNID.	CAP 50/60 + Polímero (SBS)	CAP 50/60 Puro
Penetração, 100g, 5s, 25 ⁰ C	0,1mm	61	54
Viscosidade Saybolt Furol à 135 ⁰ C	seg	503	290
Ponto de Amolecimento (Anel e Bola)	⁰ C	73	52
Ponto de Fulgor	⁰ C	262	265
Ductibilidade, a 25 ⁰ C	cm	63,5	>100
Recuperação Elástica, 20cm, 10 ⁰ C, após 1h	%	92	14,5
Índice de Pfeiffer(IP)	--	3,87	-0,52
Espuma (a 177 ⁰ C)	--	Não	Não
Densidade	--	1,03	1,02

Os resultados obtidos para a recuperação elástica com o tempo (Tabela 4.10 e Figura 4.3), permitem observar que o CAP convencional apresenta pequena recuperação, e mantém-se praticamente constante após 30 minutos, enquanto o CAP polimerizado além de apresentar RE superior a obtida com o puro, tende a aumentar com o tempo, quase chegando a 100% ao fim de 1(uma) hora.

Tabela 4.10¹: Recuperação elástica à 10⁰C

AMOSTRAS	COMPRIMENTO INICIAL, L = 20 cm			
TEMPO (min.)	5,0	10,0	30,0	60,0
RE (%)	Recuperação Elástica (%)			
CAP 50/60 PURO	9,0	11,5	14,5	14,5
CAP 50/60 + 6%SBS	77,5	83,8	89,8	92,0

¹ Resultados obtidos da média de três determinações.

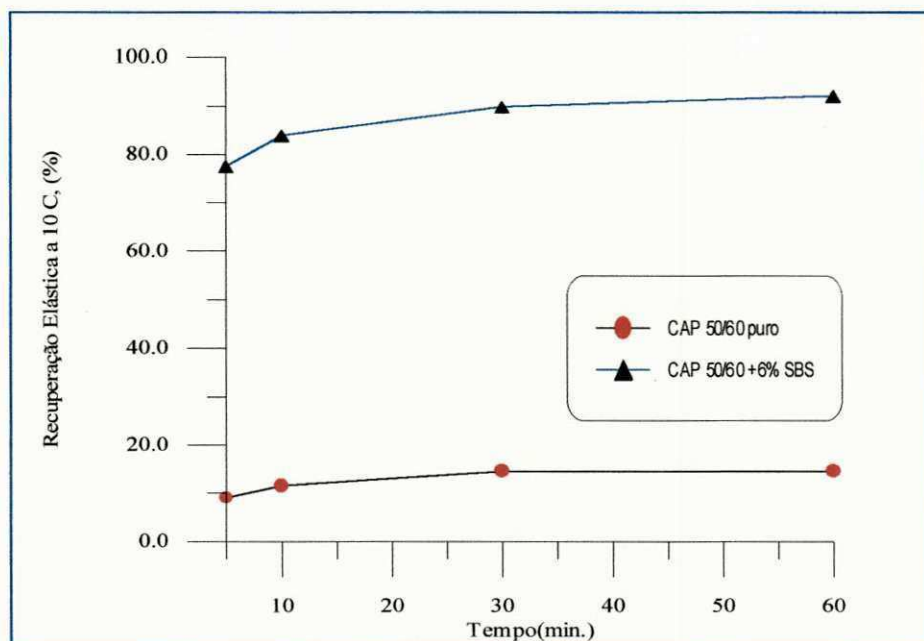


Figura 4.3: Recuperação elástica à 10^o C (%)

As temperaturas de aquecimento dos agregados, ligantes e de compressão (misturas) utilizadas na dosagem Marshall, foram fixadas em função do comportamento do gráfico de viscosidade Saybolt Furol (Figura 4.4), além de consultar recomendações de experiências de outros pesquisadores em trabalhos pesquisados. O gráfico abaixo, mostra que houve alterações no comportamento da viscosidade e S. T. entre os ligantes.

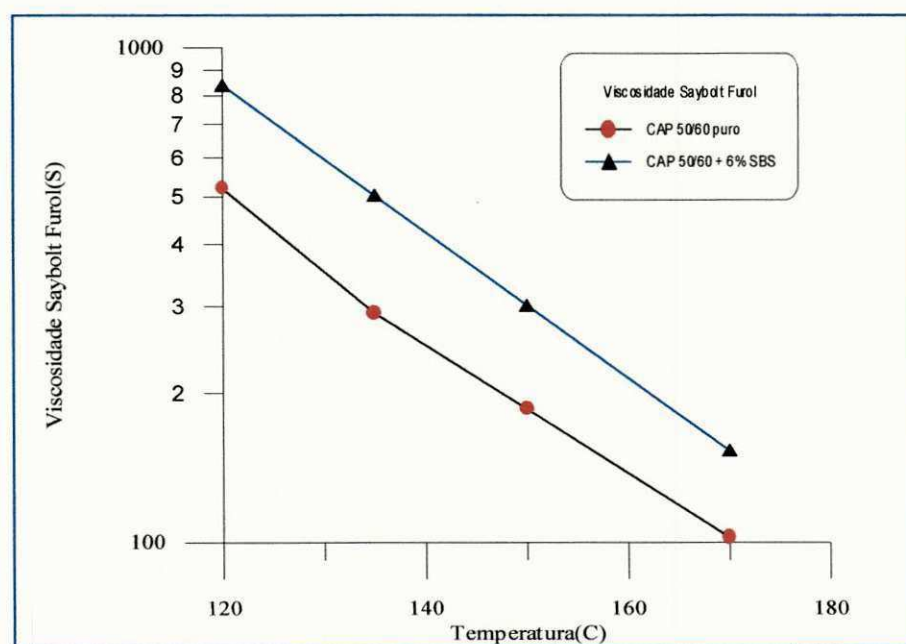


Figura 4.4: Viscosidade × Temperatura, para os dois tipos de ligantes

4.5.2) Análise comparativa das misturas utilizando-se parâmetros obtidos pelo ensaio Marshall

Entre os vários métodos desenvolvidos para indicar a resistência à deformação da mistura asfalto agregado, é o método Marshall o de maior divulgação e adotado pelo DNER. Neste estudo, o referido método é utilizado para a análise comparativa do comportamento entre os dois tipos de ligantes, embora sabendo-se das limitações de utilizar um padrão antigo de análise para avaliar o comportamento de um material considerado emergente.

A estabilidade Marshall é um dos parâmetros que têm sido bastante utilizado na análise do comportamento do asfalto modificado, sendo esta considerada um parâmetro mecânico de controle de qualidade das misturas que se utiliza rotineiramente no Brasil, embora sabendo-se de que é um ensaio que possui limitações e alvo de muita polêmica. Os resultados encontrados nas propriedades Marshall, estão apresentados nas Tabelas 4.11 e 4.12, além de suas representações gráficas nas Figuras de 4.5 a 4.14.

O que verificou-se na literatura consultada é que tanto o tipo como a quantidade de ligante betuminoso influem nos valores dos parâmetros utilizados no método Marshall. Então procura-se a seguir, examinar esses efeitos no comportamento do concreto betuminoso à quente com o uso de asfalto polimerizado.

Observou-se nos resultados obtidos na dosagem Marshall que houve uma tendência de aumento na estabilidade do asfalto modificado com polímero quando analisado em cada teor individualmente. Isso ocorreu tanto para energia de compactação de 50 como 75 golpes conforme mostram as Tabelas 4.11 e 4.12. Porém para os teores ótimos (Tabelas 4.13 e 4.14) obtidos nas duas energias de compactação os valores de estabilidade podem ser considerados semelhantes entre si.

O aumento discreto verificado na estabilidade do asfalto modificado está coerente com o ponto de vista de Endersby (1952) apud COELHO (1992), que a “estabilidade Marshall mede principalmente a coesão e a viscosidade do ligante betuminoso e de uma certa forma constitui-se também numa medida da estabilidade mecânica dos agregados”. Nesta pesquisa evidenciou um pronunciado aumento da viscosidade no asfalto polimerizado. É sabido também que esse tipo de ligante possui alta coesão.

As pesquisas do Corps Of Engineers (1948) apud COELHO (1992), revelam que dentre os parâmetros utilizados pelo método Marshall, apenas a estabilidade é fortemente afetada pelo tipo de ligante asfáltico, crescendo com o aumento da viscosidade do ligante e diminuindo com a redução deste. Na verdade entre os parâmetros Marshall obtidos neste estudo, a estabilidade é a que apresenta maior diferença no comportamento das misturas estudadas para os dois tipos de ligante. Portanto, parecendo ser dependente do tipo de ligante utilizado na mistura.

O conjunto de resultados obtidos para estabilidade variou entre 8,8 e 12,65 kN, quando o mínimo especificado é 3,5 kN, levando a questionar qual importância e consequências destes valores no comportamento real da mistura num revestimento asfáltico.

Quanto à fluência não observou-se quase nenhuma diferença nas misturas para os dois tipos de ligantes envolvidos, indicando praticamente os mesmos comportamentos. Somente para energia de 50 golpes é que encontrou-se uma ligeira diminuição na fluência quando foi utilizado o CAP modificado, observado em cada teor correspondente. Porém, mantendo-se a fluência constante na energia de 75 golpes, mostrando contudo que o asfalto polimerizado não afetou neste estudo, o comportamento final da fluência. Parecendo neste caso, a fluência ser pouco afetada quanto ao tipo de ligante.

A respeito da fluência, Goetz (1951) apud COELHO (1992) relata que no ensaio triaxial se verifica que o índice de fluência de um concreto betuminoso depende do ângulo de atrito interno dos agregados. Assim, parece que a medida de fluência Marshall pode fornecer uma medida indireta do ângulo de atrito interno dos agregados, ou seja materiais que apresentam grande fluência plástica têm baixo atrito interno. No presente estudo, os valores observados para a fluência revelam praticamente o mesmo comportamento nas duas misturas com os ligantes empregados, parecendo dessa forma ser muito mais dependente do esqueleto mineral.

Em relação ao volume de vazios, ou seja, vazios não preenchidos com ligante, observou-se um aumento para a mistura de CAP modificado e conseqüentemente uma diminuição na relação betume vazios (vazios preenchidos com CAP), podendo esse comportamento estar ligado ao aumento da consistência verificada nesse tipo de ligante.

A massa específica aparente para a mistura com AMP evidenciou uma ligeira diminuição para cada teor observado, indicando que realmente houve aumento no volume de vazios nesse tipo de ligante, sendo fato observado para os dois tipos de energias de compactação (50 e 75 golpes). Já em relação à massa específica teórica, houve um comportamento praticamente constante para os dois tipos de ligantes.

Quanto a influência da compactação, conforme relata COELHO (1992) de que todas as características que compõem o processo de compactação como: tipo de soquete compactador, natureza de compactação e energia de compactação, têm grande influência nos valores dos parâmetros utilizados pelo método Marshall. Neste estudo, utilizou-se um mesma forma de compactação (impacto) e o mesmo tipo de compactador (4,54 kgf), porém variou quanto as energias empregadas nas várias misturas (50 e 75 golpes por face).

A influência nos valores das energias de compactação contribui para alterações nos parâmetros Marshall. De acordo com COELHO (1992), baixa energia de compactação para camadas betuminosas gera baixa estabilidade Marshall, baixa densidade aparente, grande índice de vazios e baixa resistência às deformações representada por valores altos de fluência e baixos para a relação betume/vazios. Enquanto alta energia de compactação apresenta alta estabilidade Marshall, alta densidade aparente, baixo índice de vazios e melhor resistência às deformações caracterizada por valores baixo de fluência e valores mais altos para a relação betume/vazios

Os resultados encontrados para os dois valores de energias empregadas na presente pesquisa (50 e 75 golpes), revelam pouca diferença para os parâmetros obtidos na dosagem Marshall, conforme apresentam as Tabelas 4.11 e 4.12. Na estabilidade Marshall, apresenta indicação de aumento pouco expressivo para a energia de 75 golpes em relação à de 50 golpes. Para a fluência apresenta evidência de diminuição para a energia de 75 golpes, como também uma maior fluência à medida que aumenta o percentual de ligante para os dois tipos de energia. Em termos de volume de vazios e relação betume vazios, praticamente não apresenta alterações nos resultados quanto aos tipos de energias empregadas.

Portanto, demonstra-se através dos resultados encontrados, que a energia de compactação não apresenta influência nos resultados obtidos. Podendo ser resultado de influencia de outros fatores como: eventuais variações de temperatura da mistura, falta de consistência ou uniformidade da energia imposta pelo operador, além de outros.

Tabela 4.11: Resumo dos valores médios para cada teor (50 golpes por face) - E. Marshall

COMPACTAÇÃO COM 50 GOLPES POR FACE							
CAP 50/60	Teor de Asfalto(%)	δ aparente (kN/m ³)	δ teórica (KN/m ³)	RBV (%)	Vol. de Vazios(%)	Fluência (0,1 mm)	Estabilid. (kN)
CAP + POLÍMERO	5,0	21,9	23,2	66	5,5	27,9	12,61
	5,5	22,0	23,1	72	4,5	30,5	10,91
	6,0	22,1	22,9	79	3,5	38,1	11,21
	6,5	22,1	22,8	81	3,2	40,6	10,10
	7,0	21,9	22,6	82	3,1	43,2	9,44
CAP PURO	5,0	22,0	23,2	67	5,4	33,0	11,03
	5,5	22,2	23,0	77	3,6	38,1	10,50
	6,0	22,2	22,9	81	3,0	40,6	9,33
	6,5	22,2	22,7	86	2,2	40,6	9,30
	7,0	22,1	22,6	88	2,1	45,7	9,25

NOTA: δ - Massa Específica

Tabela 4.12: Resumo dos valores médios para cada teor (75 golpes por face) – E. Marshall

COMPACTAÇÃO COM 75 GOLPES POR FACE							
CAP 50/60	Teor de Asfalto(%)	δ aparente (kN/m ³)	δ teórica (kN/m ³)	RBV (%)	Vol. de Vazios(%)	Fluência (0,1 mm)	Estabilid. (kN)
CAP + POLÍMERO	5,0	21,7	23,2	63	6,5	27,9	11,38
	5,5	22,2	23,1	75	3,8	30,5	12,65
	6,0	22,2	22,9	79	3,4	33,0	11,26
	6,5	22,1	22,8	82	3,0	38,1	10,70
	7,0	22,0	22,6	83	3,0	40,6	9,65
CAP PURO	5,0	22,0	23,2	67	5,3	30,5	9,81
	5,5	22,1	23,0	76	3,8	30,5	11,30
	6,0	22,2	22,9	83	2,8	33,0	10,96
	6,5	22,2	22,7	85	2,5	35,6	10,18
	7,0	22,1	22,6	88	2,1	40,6	8,80

NOTA: δ - Massa Específica

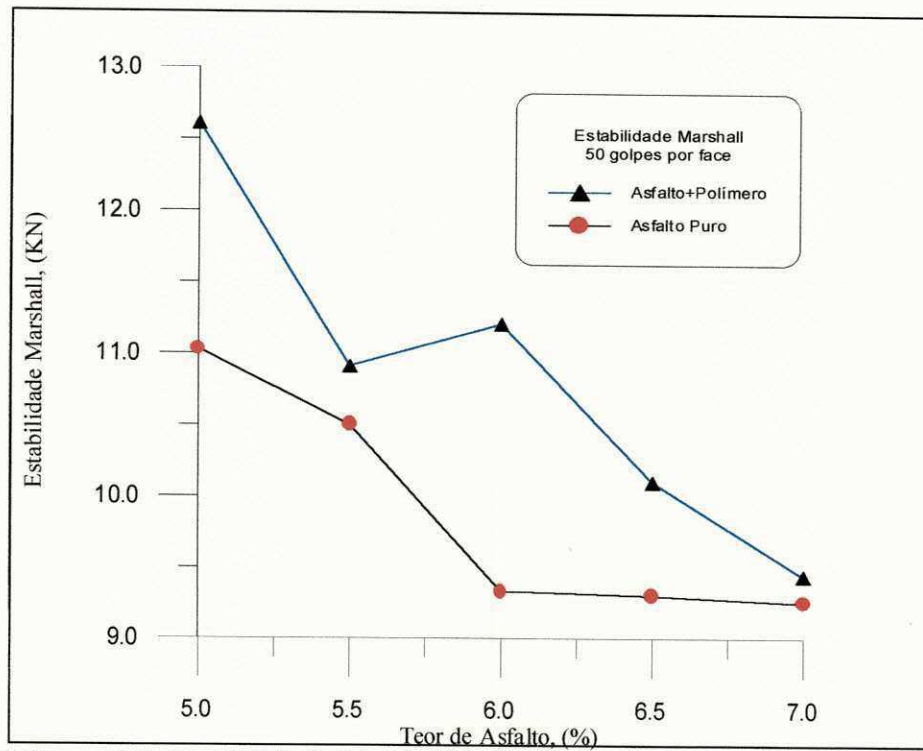


Figura 4.5: Estabilidade Marshall (50 golpes por face)

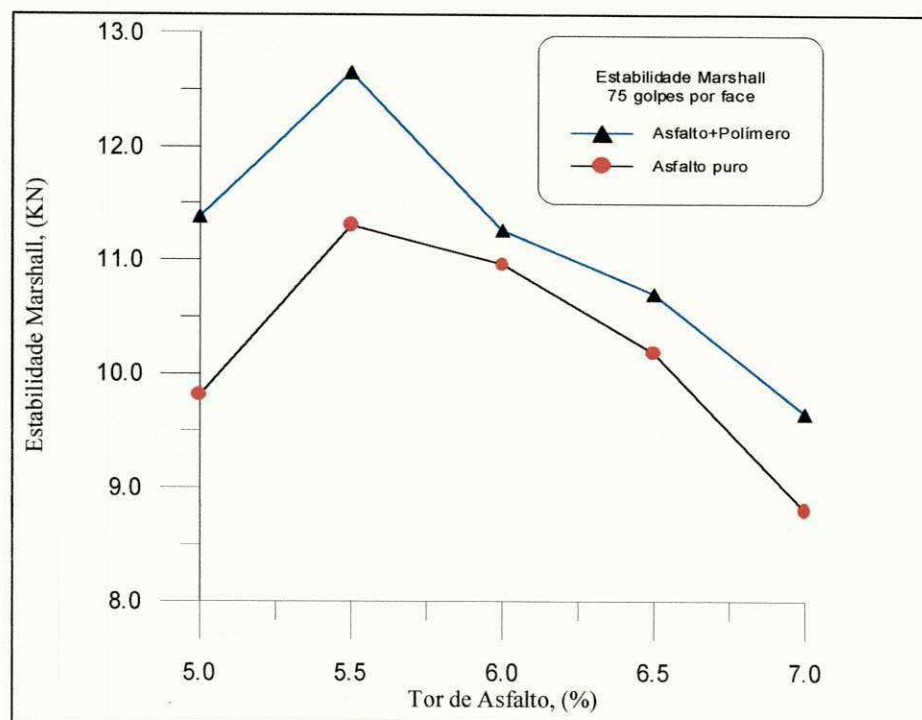


Figura 4.6: Estabilidade Marshall (75 golpes por face)

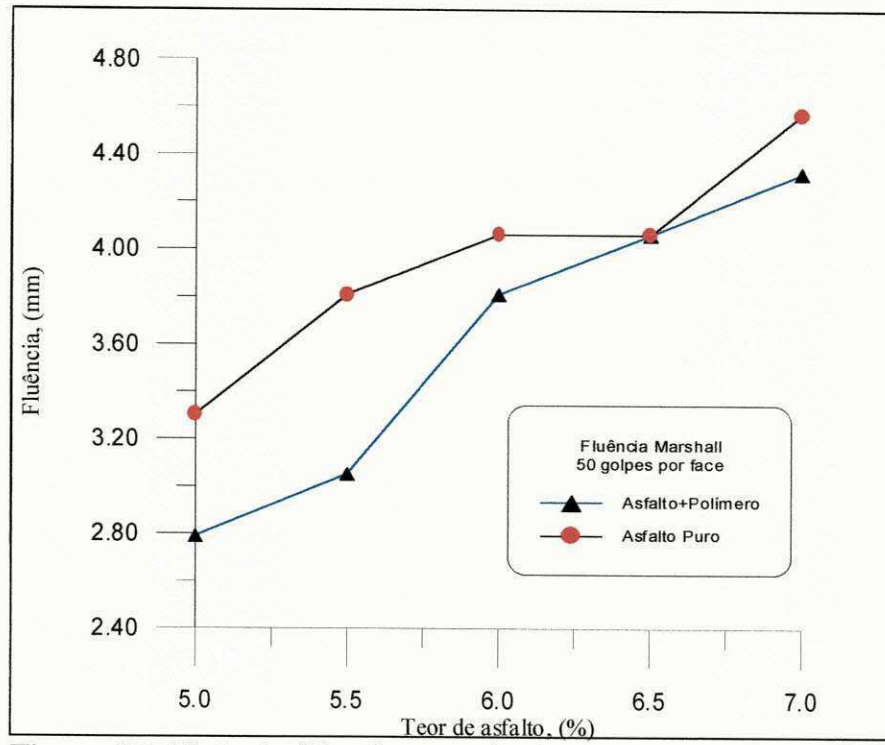


Figura 4.7: Fluência (50 golpes por face)

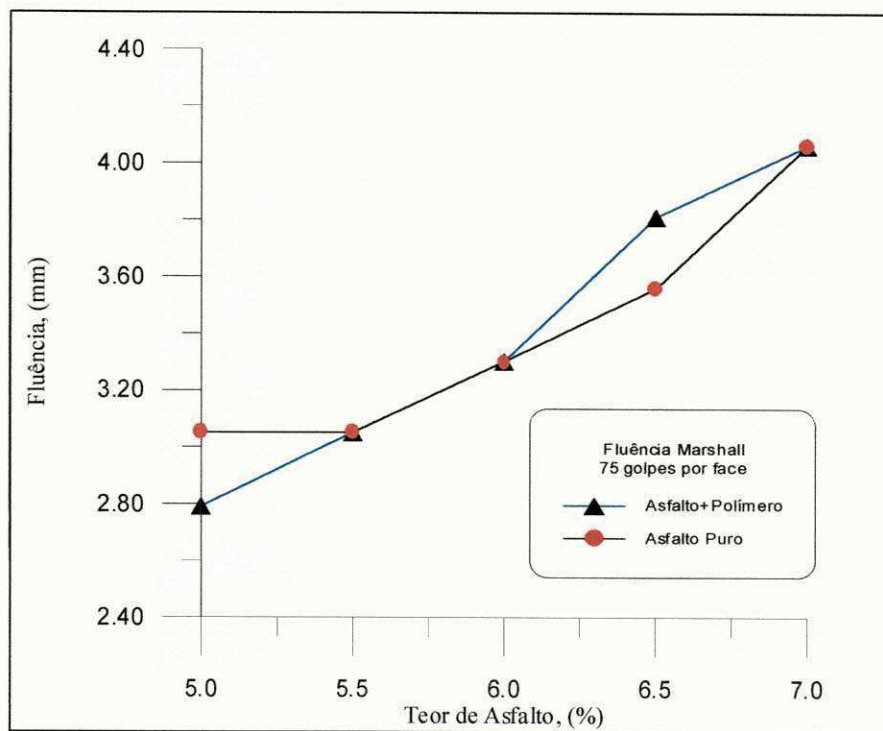


Figura 4.8: Fluência (75 golpes por face)

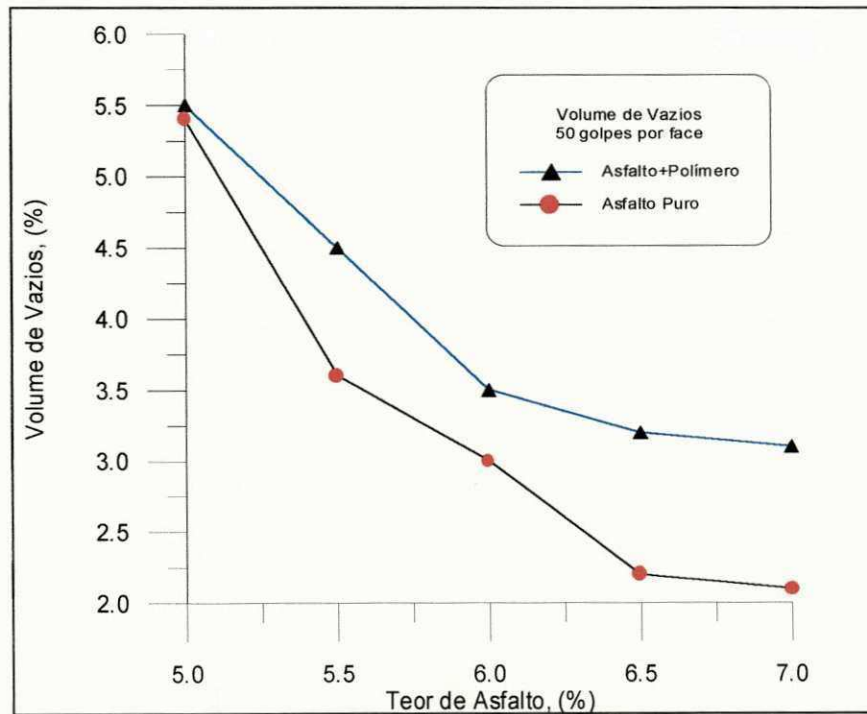


Figura 4.9: Volume de vazios (50 golpes por face)

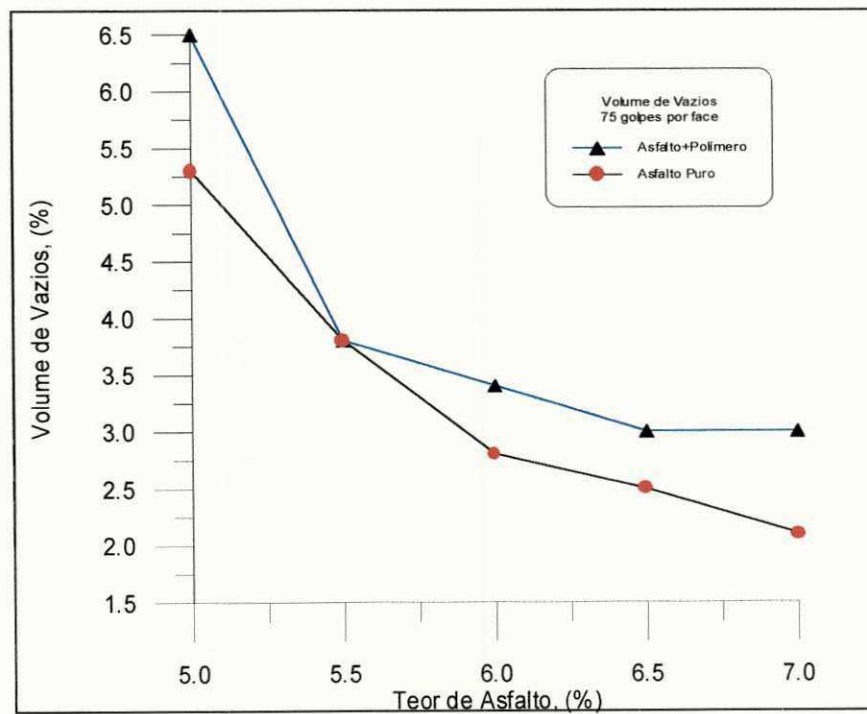


Figura 4.10: Volume de vazios (75 golpes por face)

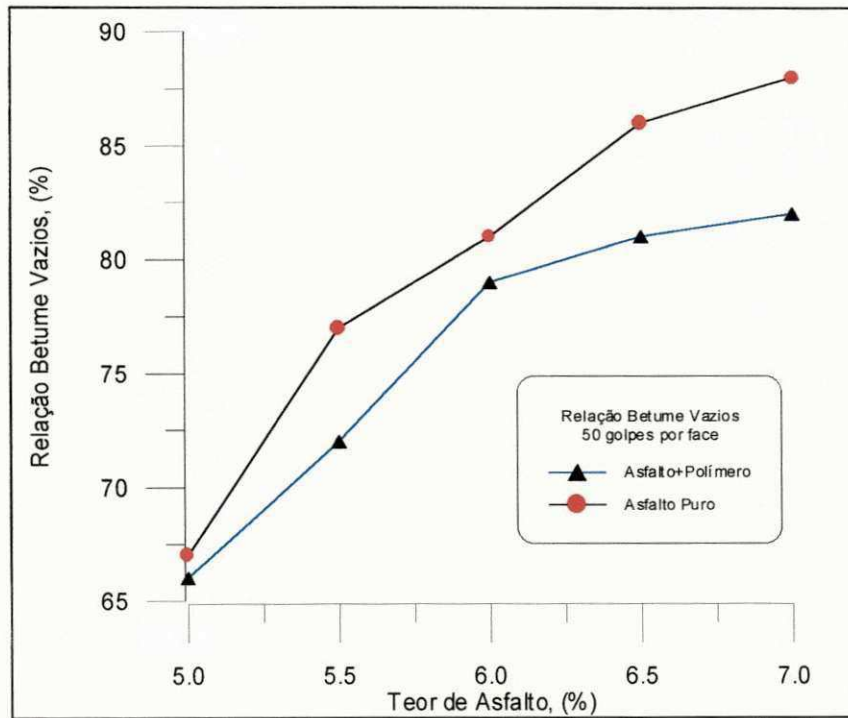


Figura 4.11: Relação betume vazios-RBV (50 golpes por face)

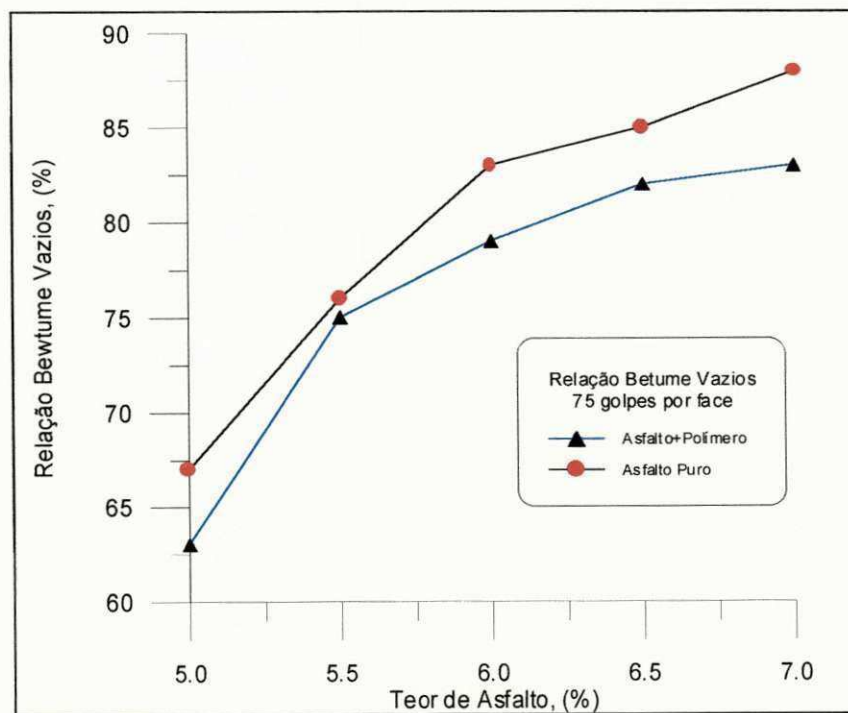


Figura 4.12: Relação betume vazios-RBV (75 golpes por face)

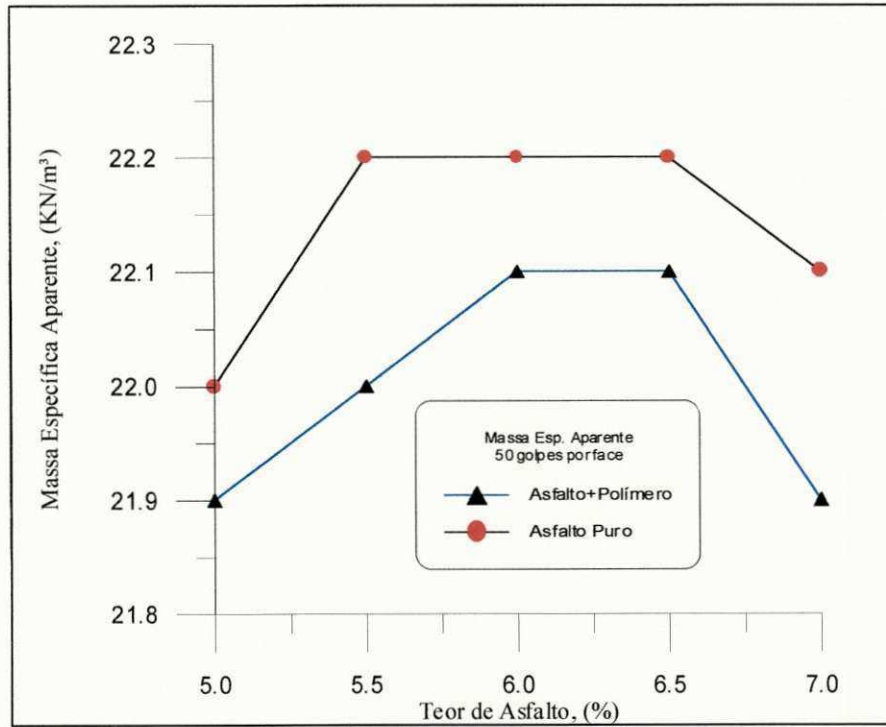


Figura 4.13: Massa específica aparente (50 golpes por face)

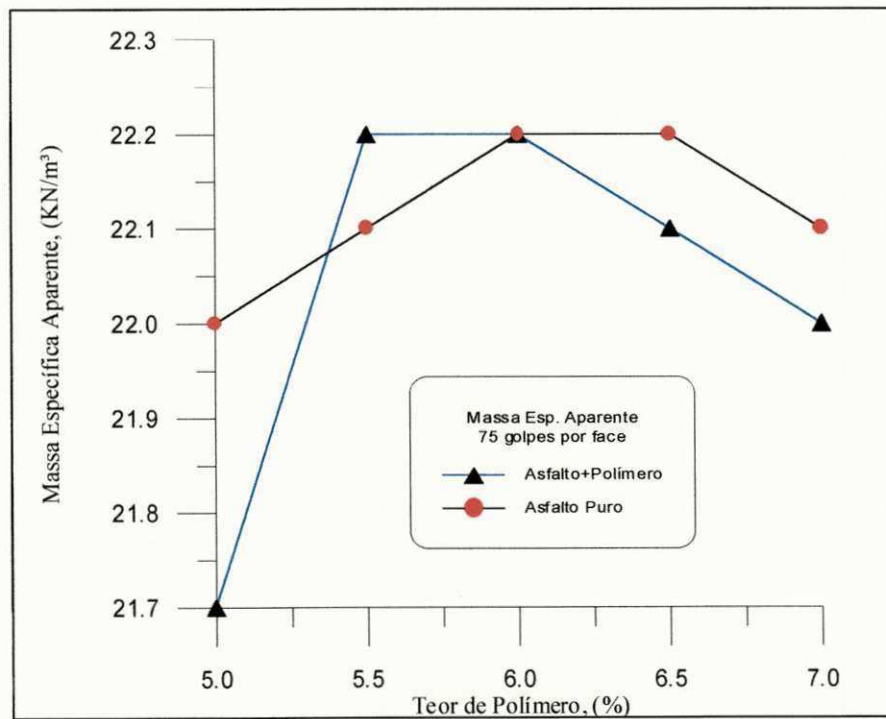


Figura 4.14: Massa específica aparente (75 golpes por face)

As Tabelas abaixo 4.13 e 4.14, mostram o resumo dos parâmetros obtidos nas dosagens Marshall, para as duas energias aplicadas, 50 e 75 golpes. Apresenta também na Tabela 4.15, o traço indicado para os dois tipos de ligantes envolvidos.

Tabela 4.13: Parâmetros obtidos na ajustagem gráfica da dosagem Marshall para 50 golpes

TIPOS DE LIGANTES	VALORES FINAIS AJUSTADOS NA DOSAGEM MARSHALL				
	<i>Estabilidade (kN)</i>	<i>Fluência (0,1mm)</i>	<i>V. vazios (%)</i>	<i>RBV (%)</i>	<i>Teor ótimo¹ ligante, (%)</i>
CAP + POLÍMERO	11,21	38,1	3,5	79	6,0
CAP PURO	10,50	38,1	3,6	77	5,5

Tabela 4.14: Parâmetros obtidos na ajustagem gráfica da dosagem Marshall para 75 golpes

TIPOS DE LIGANTES	VALORES FINAIS AJUSTADOS NA DOSAGEM MARSHALL				
	<i>Estabilidade (KN)</i>	<i>Fluência (0,1mm)</i>	<i>V. vazios (%)</i>	<i>RBV (%)</i>	<i>Teor ótimo¹ ligante, (%)</i>
CAP + POLÍMERO	11,26	33,0	3,4	79	6,0
CAP PURO	11,30	30,5	3,8	76	5,5

Tabela 4.15²: Dosagem em peso ajustada para os teores ótimos

TIPOS DE LIGANTES	TRAÇO RECOMENDADO, EM PESO (para 50 e 75 golpes)			
	<i>Brita calcária (%)</i>	<i>Areia (%)</i>	<i>Filer calcário (%)</i>	<i>Teor ótimo de ligante, (%)</i>
CAP + POLÍMERO	71,4	18,8	3,8	6,0
CAP PURO	71,8	18,9	3,8	5,5

¹ Teor ótimo obtido a partir da estabilidade e densidade aparente máxima e média dos outros parâmetros Marshall

² Esta dosagem enquadrou-se nas especificações do DNER, reproduzidas na tabela 3.1

Os resultados obtidos de estabilidade e fluência Marshall foram analisados empregando a fórmula de Metcalf (1959) apud COELHO (1992), COELHO & QUEIROZ (1992), COELHO & SÓRIA (1992). Esta fórmula permite verificar a capacidade de suporte de uma determinada mistura asfáltica. Porém, ressaltando que de até o momento, não se conhece a indicação de resultados que tenham apresentado correlação com o desempenho em campo.

$$C = \frac{S}{F} \times \frac{(120 - F)}{100}, \text{ onde: } C = \text{Capacidade de suporte (psi)} \quad (4.1)$$

S = Estabilidade Marshall (lb)

F = Fluência (0,01")

Para Metcalf, a estabilidade Marshall não fornece uma medida adequada da capacidade de um pavimento resistir às deformações. O uso conjunto da estabilidade e da fluência Marshall, através da expressão acima, é para esse autor, mais significativo. Além disso, hoje existe a recomendação de outros ensaios, como módulo de resiliência e a resistência a tração por compressão diametral, em complemento ao ensaio Marshall.

As misturas com asfalto polimerizado apresentaram um melhor comportamento quando analisadas pela capacidade de suporte, conforme se verifica através da Tabela 4.16 e das Figuras 4.15 e 4.16. Em pesquisa de SALATHÉ et alii (1990) apresenta-se também um melhor comportamento na capacidade de suporte para a mistura como asfalto polímero, ou seja, valores de S = 128psi para CAP 85/100 e S = 167psi para o CAP 85/100 + 6% SBS.

Tabela 4.16: Capacidade de suporte, utilizando a fórmula de Metcalf

Fórmula de METCALF	CAPACIDADE DE SUPORTE (psi *)									
	50 golpes por face					75 golpes por face				
Compactação	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Teor de Ligante	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
CAP 50/60 + Polímero(SBS)	274,9	216	172,6	144,4	125,8	248,1	250,5	203,9	164,8	138
CAP 50/60	199,7	161,7	133,4	133	115,3	194,2	223,7	198,5	169,6	125,8

*1 psi = 0,07Kgf/cm²

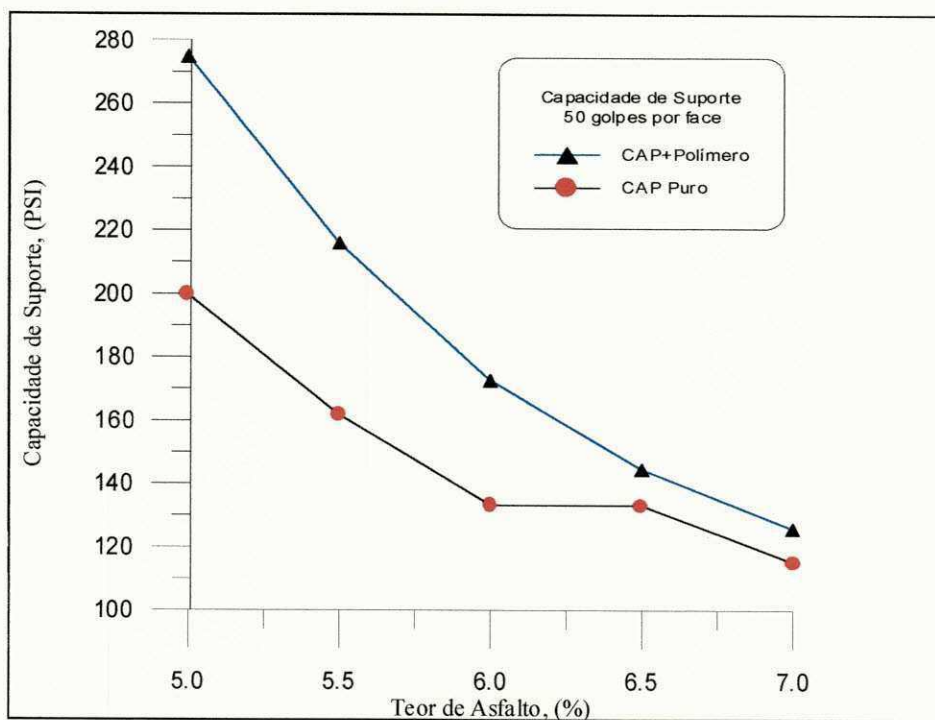


Figura 4.15: Capacidade de suporte (Fórmula de Metcalf) - 50 golpe

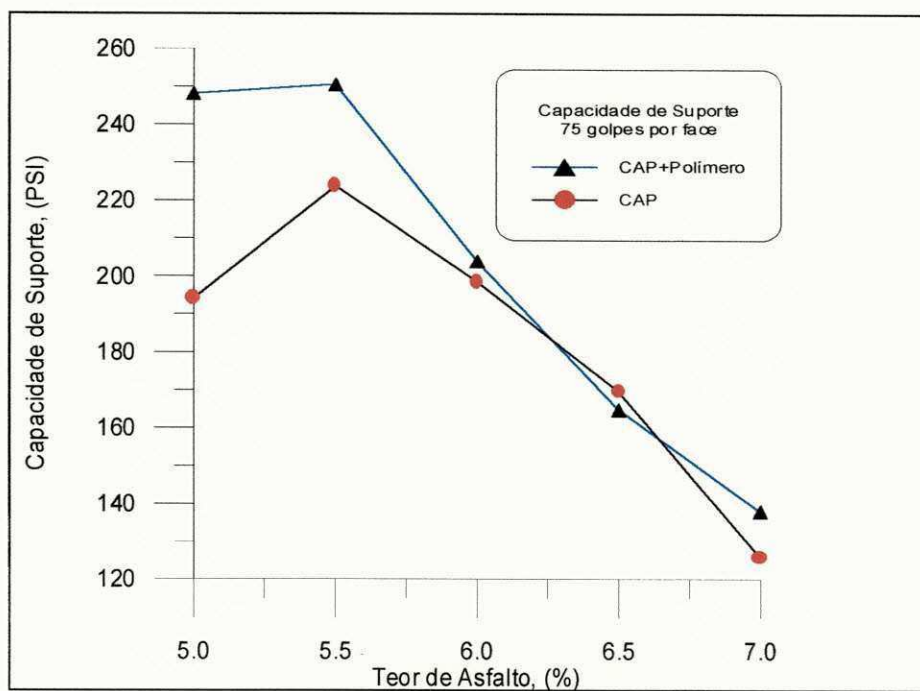


Figura 4.16: Capacidade de suporte (Formula Metcalf) - 75 golpes

4.5.3) Análise comparativa das misturas pelo módulo de resiliência

Com o apoio do laboratório da COPPE/UFRJ procedeu-se o ensaio de compressão diametral para determinação do módulo de resiliência. Os valores obtidos para módulo de resiliência a 25^o C, das misturas estudadas neste trabalho estão apresentados na Tabela 4.17, e mostraram pequena diferença no comportamento das misturas fabricadas com os diferentes ligantes.

Verifica-se que houve uma pequena diferença nos módulos resilientes encontrados para as misturas fabricadas com asfalto polimerizado e puro. Os resultados mostram um ligeiro acréscimo nos módulos resiliente quando foi utilizado o CAP polimerizado para as amostras moldadas com 75 golpes, enquanto que, para as amostras moldadas com 50 golpes praticamente não apresentou variação nos valores dos módulos.

Embora dentro de uma faixa aceitável, esperava-se valores de módulos resiliente para a misturas fabricada com o asfalto polimerizado inferior às realizadas com o ligante convencional, uma vez que, a literatura relata uma maior flexibilidade para as misturas com esse tipo de ligante.

Tabela 4.17: Resultados de módulo de resiliência

AMOSTRAS	Dap.	MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MPa)				σ_i (MPa)	MR/ σ_i
		n	MR	σ	CV(%)		
CAP 50/60 (50 golpes)	2,190	9	3728	558	15,0	1,0	3728
CAP 50/60 + 6%SBS (50 golpes)	2,197	9	3917	762	19,4	1,12	3497
CAP 50/60 (75 golpes)	2,187	9	3104	575,5	18,5	0,94	3302
CAP 50/60 + 6%SBS (75 golpes)	2,190	9	3912	972	24,8	1,18	3315

Através dos resultados encontrados verificou-se que houve um aumento da resistência à tração e uma diminuição do módulo resiliente, quando se acrescenta o polímero a mistura, e portanto é esperado que a razão módulo de resiliência/resistência à tração seja menor. O módulo de resiliência de uma mistura é função do tipo de ligante, composição granulométrica, % de vazios e do teor de ligante. Porém neste estudo analisou-se apenas o tipo de ligante no teor ótimo determinado pelo método Marshall.

Para efeito de comparação são apresentados na Tabela 4.18, resultados obtidos por outros pesquisadores. Verifica-se uma diminuição do módulo de resiliência nas misturas com maiores percentagens de polímero. Vale salientar que neste estudo o percentual de polímero é constante e igual a 6% de SBS, enquanto no trabalho de CERATTI et alii (1996) não se conhece o percentual de polímero adicionado ao CAP, sabe-se apenas o teor de ligante empregado na mistura.

Tabela 4.18: Resultados de módulo de resiliência a 25^o C de outros pesquisadores

REFERÊNCIA	TIPO DE LIGANTE	TEOR ÓTIMO, %	FAIXA GRAN.	σ_i (MPa)	MR (MPa)	MR/ σ_i
OLIVEIRA (1997)	RASF PURO	6,4	C	1,26	4589	3642
	RASF + 3% SBS	5,5	C	1,29	5578	4324
	RASF + 5% SBS	5,4	C	0,58	2007	3460
	RASF + 7 % SBS	5,5	C	0,66	2357	3571
CERATTI et alii (1996)	CAP 20	5,7	B	1,17	6500	5556
	CAP 20 + Betuflex	6,0	B	1,55	1800	1161
MACÊDO (1996)	CBUQ + Betuflex	-	-	1,52	5222	3436
	PMQ + Betuflex	-	-	1,16	3976	3428
DNER (1998)	CAP 20	5,2	B	0,97	3224	3324
	4%SBS Coperbo	5,2	B	0,74	2272	3070
	6%SBS Coperbo	5,2	B	0,83	2327	2804
	4%SBS Petrobrás	5,4	B	1,20	2668	2223
	7%SBS Petrobrás	5,4	B	0,90	1424	1582
	4%SBS Ipiranga	5,4	B	1,01	2697	2670
	6%SBS Ipiranga	5,4	B	0,89	2081	2338
ESTE ESTUDO	CAP50/60(50golpes)	5,5	B	1,00	3728	3728
	CAP50/60 + 6% SBS (50 golpes)	6,0	B	1,12	3917	3497
	CAP50/60(75golpes)	5,5	B	0,94	3104	3302
	CAP50/60 + 6%SBS (75golpes)	6,0	B	1,18	3912	3315

Para verificar a influência do tipo de ligante no comportamento do módulo de resiliência das misturas foi conduzido um tratamento estatístico baseado nos dados apresentados na Tabela 4.19.

Tabela 4.19: Média e variância amostral do módulo de resiliência

Propriedade	Módulo de Resiliência (MPa)			
	50 golpes		75 golpes	
Energia de compactação				
Tipo de ligante	CAP+6%SBS	CAP Puro	CAP+6%SBS	CAP Puro
Nº de copros-de-prova (n)	n=9	n=9	n=9	n=9
Média amostral (MPa)	$\bar{X}_1=3917$	$\bar{X}_2=3728$	$\bar{X}_1=3912$	$\bar{X}_2=3104$
Variância amostral(MPa) ²	$S_1^2=580922$	$S_2^2=311012$	$S_1^2=945453$	$S_2^2=331245$

Analisando-se os resultados obtidos com a energia de 50 golpes:

Verificando-se a relação entre variâncias através de teste de hipótese, analisou-se duas alternativas: $H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$; $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$, onde H_0 é a hipótese nula e H_1 a hipótese alternativa. σ_1^2 e σ_2^2 são as variâncias das duas populações consideradas. Rejeita-se a hipótese H_0 (variâncias iguais), ao nível de significância estabelecido, toda vez que o valor do parâmetro estatístico calculado for superior ao obtido pela distribuição F. A decisão é de rejeitar ou não H_0 através da observação de um teste estatístico $F = S_1^2 / S_2^2$ (razão entre a maior e a menor variância), onde S_1^2 e S_2^2 são estimativas não tendenciosas das variâncias das populações σ_1^2 e σ_2^2 respectivamente. Adotando-se um nível de significância de 20% (o valor de F, na tabela correspondente à metade do nível de significância estabelecido) e com (n_1-1) e (n_2-1) graus de liberdade, onde n_1 e n_2 são os tamanhos das amostrais correspondentes aos corpos-de-prova com CAP+Polímero e CAP puro respectivamente.

A estatística S_1^2 / S_2^2 observada é igual a 1,87, enquanto os pontos críticos obtidos pela distribuição de F de um teste bilateral estão compreendidos no intervalo (0,39; 2,59). Portanto, como S_1^2 / S_2^2 calculado (observada) está contido no intervalo referido, a hipótese $H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ não é rejeitada, e assim pode-se assumir que $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$, e que estas são iguais a uma variância comum, com isto, pode-se estimar a variância comum através de uma agrupada: $S_p^2 = [(n_1-1) S_1^2 + (n_2-1) S_2^2] / (n_1 + n_2 - 2)$. O objetivo agora é verificar se as médias são diferentes, através de um teste de diferença entre médias, utilizando-se a estatística: $t_{n_1+n_2-2} = [\bar{X}_1 - \bar{X}_2 - (\mu_1 - \mu_2)_0] / [S_p^2(1/n_1 + 1/n_2)]^{1/2}$, onde \bar{X}_1

e \bar{X}_2 são estimativas não tendenciosas das médias populacionais e $(\mu_1 - \mu_2)_0$ representa a diferença hipotetizada entre as médias populacionais, geralmente escolhida como zero. O teste de hipótese apresenta a seguinte forma: $H_0: \mu_1 = \mu_2$; $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$, onde H_0 é a hipótese nula e H_1 é a hipótese alternativa. A decisão está entre rejeitar ou não H_0 através da distribuição t para um nível de significância escolhido. No caso analisado o valor observado para t_{16} é igual a 0,6. Baseado numa distribuição t_{16} a probabilidade de observar um valor de 0,6 ou superior é inferior a 1% ($t_{0,01}=2,58$). Portanto não se pode rejeitar a hipótese $H_0: \mu_1 = \mu_2$, e pode-se concluir que o módulo resiliente da mistura permanece inalterado com adição de polímero a mistura asfáltica analisada neste estudo.

A mesma análise estatística foi feita para o módulo de resiliência com a energia de 75 golpes. A estatística S_1^2 / S_2^2 observada neste caso é 2,85, e com graus de liberdade igual a $n_1 - 1$ (numerador) e $n_2 - 1$ (denominador) e nível de significância: $\alpha = 20\%$ (teste bilateral). Como o valor de observado de F (2,85) é maior que o encontrado (2,59), rejeita-se a hipótese H_0 , ou seja, as variâncias são desiguais ao nível de significância estabelecido ($\alpha = 20\%$). Como as variâncias são desiguais, pode-se segundo VIEIRA (1998) comparar as duas médias, aplicando-se o teste t , na forma descrita a seguir:

$$t = \frac{\bar{X}_2 - \bar{X}_1}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$$

O grau de liberdade associado ao valor de t , é a parte inteira do número g , obtido pela fórmula:

$$g = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}} = 13$$

O valor observado para t_{13} é igual a 2,14. Entretanto para uma distribuição t com 13 grau de liberdade, a probabilidade de observar um valor igual ou superior a 2,14 é inferior a 1% ($t_{0,01}=2,65$). Portanto, deve-se aceitar a hipótese H_0 para concluir que o módulo de resiliência não é alterado pela adição do polímero.

4.5.4) Análise comparativa das misturas pelo método de resistência a tração indireta

A resistência a tração estática é considerada de grande importância para avaliação do comportamento estrutural de misturas betuminosas.

Determinou-se a resistência a tração por compressão diametral, verificando-se diferença nas misturas com os dois tipos de ligantes. Os valores estão apresentados na Tabela 4.20, referem-se a média de três corpos-de-prova modelados no teor ótimo de ligante.

Tabela 4.20: Resistência a tração indireta

AMOSTRAS	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO ESTÁTICA (MPa)
CAP PURO (50 golpes)	1,00
CAP + POLÍMERO (50 golpes)	1,12
CAP PURO (75 golpes)	0,94
CAP + POLÍMERO (75 golpes)	1,18

Observando os valores de resistência obtidos, verifica-se que as misturas com polímeros apresentaram maior resistência a tração do que as misturas convencionais, com aumento da resistência original variando entre 12 e 25%. Estes resultados estão coerentes com os valores obtidos por CERATTI et alii (1996) que atribuem o aumento de resistência de misturas com polímeros SBS, em relação a misturas convencionais, a ação conjunta do estireno-butadieno. Este último ocasiona um aumento da resistência a tração com a extensão, enquanto que o primeiro teria a função de proporcionar rigidez ao ligante.

Para análise comparativa, na Tabela 4.21 estão apresentados resultados de tração indireta, obtidos em outros estudos realizados em misturas betuminosas fabricadas com brita granítica, variando o tipo de ligante, a faixa granulométrica, as percentagens e o tipo de polímero empregado nas misturas.

Tabela 4.21: Estudo comparativo de resistência a tração estática entre vários estudos

REFERÊNCIA	TIPO DE LIGANTE	FAIXA GRAN.	TEOR ÓTIMO, %	σ (MPa)
OLIVEIRA (1997)	RASF PURO	C	6,4	1,26
	RASF + 3%SBS	C	5,5	1,29
	RASF + 5%SBS	C	5,4	0,58
	RASF + 7%SBS	C	5,5	0,66
CERATTI et alii (1996)	CAP 20	B	5,7	1,17
	CAP 20 +BETUFLEX	B	6,0	1,55
MACÊDO (1996)	CBUQ + BETUFLEX	-	-	1,52
	PMQ + BETUFLEX	-	-	1,16
DNER (1998)	CAP 20	B	5,2	0,97
	4%SBS Coperbo	B	5,2	0,74
	6%SBS Coperbo	B	5,2	0,83
	4%SBS Petrobrás	B	5,4	1,20
	7%SBS Petrobrás	B	5,4	0,90
	4%SBS Ipiranga	B	5,4	1,01
	6%SBS Ipiranga	B	5,4	0,89
ESTE ESTUDO	CAP 50/60(50 golpes)	B	5,5	1,00
	CAP 50/60 + 6%SBS (50 golpes)	B	6,0	1,12
	CAP 50/60(75 golpes)	B	5,5	0,94
	CAP 50/60 + 6%SBS (75 golpes)	B	6,0	1,18

Fazendo-se uma análise comparativa dos resultados encontrados neste estudo (Tabela 4.20) com resultados obtidos por outros pesquisadores, Tabela 4.21, verifica-se que as resistências neste estudo estão compreendidas na faixa de variação da resistência a tração indireta por outros pesquisadores. Entretanto, a tendência de aumento de resistência pela adição de polímero, conforme obtida neste estudo foi verificada por CERATTI et alii (1996) ao contrário dos valores obtidos por OLIVEIRA (1997) e DNER (1998) que verificaram tendência de decréscimo da resistência com a adição de polímero.

Para a análise estatística da resistência à tração estática indireta (50 e 75 golpes) foram empregados dados apresentados na Tabela 22.

Tabela 22: Média e variância amostral de resistência à tração estática indireta

Propriedade	Resistência à tração estática indireta (MPa)			
	50 golpes		75 golpes	
Energia de compactação				
Tipo de ligante	CAP+6%SBS	CAP Puro	CAP+6%SBS	CAP Puro
Nº de corpos-de-prova (n)	n=3	n=3	n=3	n=3
Média amostral (MPa)	$\bar{X}_1=1,12$	$\bar{X}_2=1,00$	$\bar{X}_1=1,18$	$\bar{X}_2=0,94$
Variância amostral (MPa) ²	$S_1^2=0,006$	$S_2^2=0,0009$	$S_1^2=0,022$	$S_2^2=0,0027$

Para 75 golpes, a estatística S_1^2/S_2^2 observada é igual a 6,67, enquanto os pontos críticos obtidos pela distribuição de F estão compreendidos no intervalo (0,11; 9,0) para um nível de significância de 20%. Portanto, como o valor observado de F (6,67) está dentro deste intervalo, a hipótese $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ não é rejeitada, pode-se assumir que as variâncias são iguais a uma comum e estimada por uma agrupada S_p^2 . O objetivo agora é verificar, por meio do teste estatístico t , se as médias resistência à tração indireta são iguais. O valor observado para $t_4=2,50$. Entretanto para uma distribuição t com 4 graus de liberdade e para o nível de significância estabelecido de 1% encontrou-se um valor (3,74) superior ao observado. Portanto, não rejeita-se a hipótese H_0 , conclui-se que a resistência à tração indireta não é alterada pela adição do polímero, para o nível de significância estabelecido.

Com 50 golpes, a estatística S_1^2/S_2^2 observado é igual a 8,15, enquanto os pontos críticos obtidos pela distribuição de F estão compreendidos no intervalo (0,11; 9,0) para um nível de significância de 20%. Portanto, como o valor observado de F (8,15) está dentro deste intervalo, a hipótese $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ não é rejeitada, pode-se assumir que as variâncias são iguais a uma comum, e estimada por uma agrupada S_p^2 . O objetivo agora é verificar, por meio do teste estatístico t , se as médias resistência à tração indireta são iguais. O valor observado para $t_4=2,65$. Entretanto para uma distribuição t com 4 graus de liberdade e para o nível de significância estabelecido de 1% encontrou-se um valor (3,74) superior ao observado. Portanto, não rejeita-se a hipótese H_0 , conclui-se que a resistência à tração indireta não é alterada pela adição do polímero, para o nível de significância estabelecido.

CAPÍTULO - 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Baseado nos resultados obtidos neste estudo são apresentadas a seguir conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

5.1) CONCLUSÕES

- Verificou-se um aumento significativo em termos percentuais no valor da recuperação elástica, indicando um ganho de propriedades elástica do asfalto polímero e caracterizando um asfalto bastante flexível, tornando-o recomendado para formulação de mistura altamente flexível;
- Constatou-se um aumento da consistência do sistema CAP-SBS, verificado através do elevado aumento no valor determinado para a viscosidade Saybolt-Furol. Embora sabe-se de que este equipamento não seja adequado para medir a consistência, pois é apenas um índice empírico que está associado à consistência;
- Mostrou-se um aumento do ponto de amolecimento, proporcionando assim, um aumento na plasticidade, que é representado pelo intervalo que separa o ponto Fraass do ponto de amolecimento. Há uma indicação de diminuição da suscetibilidade térmica, que é medida pelo intervalo de plasticidade porém com valores inversamente proporcionais;
- Na análise da estabilidade, observou-se um aumento para a mistura fabricada com o asfalto polímero, em cada teor correspondente, indicando um ganho de resistência mecânica. Apresentou-se também um melhor comportamento do CAP-SBS, quanto à capacidade de suporte de METCALF, representado pelo uso conjunto da fluência e estabilidade Marshall;

- A fluência da mistura não apresentou alterações devido ao emprego do asfalto polimerizado, apesar de ser esperado uma menor fluência para misturas fabricadas com asfalto modificado devido sua maior consistência;
- Análise também considerada importante neste estudo é a adesividade observada para esse novo tipo de ligante, mostrando um resultado plenamente satisfatório com o agregado graúdo calcário;
- Os teores ótimos observados foram mais elevados para misturas fabricadas com o asfalto polimerizado em relação ao puro. Provavelmente ocorrido em função de sua maior viscosidade, pois ligante mais viscoso exige um maior consumo para o completo envolvimento com a partícula;
- A energia empregada para compactação da mistura parece não influir no comportamento do tipo de ligante na mistura;
- A flexibilidade praticamente não sofreu influência do tipo de ligante empregado, entretanto houve ganho nas resistências à tração das misturas fabricadas com asfalto polimerizado;
- Os resultados encontrados nas propriedades do agregado graúdo, calcário, apresentaram no geral satisfatórios, para propriedades tais como: índice de forma, adesividade, granulometria, massa específica real, resistência ao esmagamento e a 10% de finos. O ensaio de Los Angeles apresentou resultado elevado, mas atendendo às especificações de asfalto polímero. A absorção embora não contemplada nas especificações de agregado para utilização em CBUQ no Brasil, merece atenção especial, visto que para este agregado estudado foi muito elevada;
- Após a extração do ligante observou um teor de ligante menor do que projetado, redução significativa na absorção do agregado graúdo, porém, sendo menor para a mistura com o asfalto polímero. Observou-se também degradação na granulometria da mistura, porém mantendo-se dentro da faixa pré-estabelecida.

Tendo-se como conclusão geral que a adição do polímero SBS ao CAP alterou o comportamento de suas propriedades, como também constatou-se modificações nas misturas com o ligante modificado em relação ao puro. Portanto, seria interessante a quantificação dessas modificações e contudo certificar suas reais mudanças. Como também uma verificação se realmente aumenta a vida útil, ou suporta uma redução de espessura dos revestimento a ponto que possa justificar sua aplicação técnica e/ou econômica.

As conclusões nesta pesquisa decorrem de resultados de ensaios, na maioria convencionais, para a análise das propriedades físicas e mecânicas do ligante e mistura; e portanto limitadas, apontando para necessidade de um estudo mais complexo para se ter uma conclusão mais abrangente. Entretanto vale ressaltar a investigação de novos materiais buscando esclarecer pontos de vista ainda nebulosos dentro de critérios mais rígidos que a propaganda empreendida pelos fornecedores de polímeros.

5.2) *SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS*

- Execução de trechos experimentais e com um devido acompanhamento técnico, para verificação do comportamento em campo deste tipo de ligante. Analisando inclusive variações de espessuras;
- Estudar misturas drenantes fabricadas com asfalto modificado analisando principalmente a coesão no ensaio Cantabro;
- Analisar o comportamento de emulsões com esse tipo de ligante;
- Proceder a análise econômica minuciosa para esse tipo de ligante em várias misturas;
- Analisar o comportamento estrutural de várias seções para verificação da influência de misturas fabricadas com asfalto polimerizado no desempenho do pavimento;
- Verificar o efeito da granulometria no comportamento da mistura com asfalto-polímero, observando-se as tendências nas várias faixas do DNER.

CAPÍTULO - 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6.1) BIBLIOGRAFIA – OBRAS REFERENCIADAS

- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas, (1993), Concreto Betuminoso Usinado à Quente, NBR 12949, Rio de Janeiro/RJ.
- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas, (1993), Materiais Para Concreto Betuminoso Usinado a Quente, NBR 12948, Rio de Janeiro/RJ.
- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas, (1993), Dosagem de Misturas Betuminosas pelo Método MARSHALL, NBR 12891, Rio de Janeiro/RJ.
- BAUER, L. A. F., (1995), Materiais de Construção, 5ª Ed, Editora Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro/RJ.
- BIRMAM, S., (1969), Concreto Asfalto, Associação Brasileira de Pavimentação, 10ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPv, Bahia/BA.
- BLASS, A., (1988), Processamento de Polímeros, Ed. da UFSC, 2ª Ed., Florianópolis/SC
- BRASILEIRO, F. E., (1983), Estudo Comparativo do Comportamento de Concretos Betuminosos à Quente, Fabricados com Agregados Graúdos Convencionais e não Convencionais, Quando Utilizado o Ensaio de Estabilidade Marshall, Dissertação de Mestrado, Universidade de Federal da Paraíba, Campina Grande/PB.
- BRASILEIRO, F. E., LUCENA, F. B. & ARAÚJO, H. V. C., (1988), A absorção da Água e seus Efeitos nas Propriedades Físicas e Mecânicas de Agregados Graúdos com Diferentes Teores de Umidade, 9º Encontro de Asfalto-IBP, Rio de Janeiro/RJ.
- BRULÉ, B., (1986), Liants Modifiés par des Polymères pour Enduits et Eurobés Speciaux Rapports des Laboratoires, PC-5.
- CASTRO NETO, A. M., (1996), Determinação da Densidade Máxima Teórica de Misturas Betuminosas, 30ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPv, Salvador/BA.
- CERATTI, J. A., PETRUCCI, C. & SOUZA, C., (1995), Estudo do Comportamento Mecânico de Concreto Asfáltico com Asfalto Modificado com Polímero, 8º Congresso Latino Americano Del Asfalto, Santa Cruz de La Sierra-Bolívia, V. 1, p. 1-12.
- COÊLHO, M. R., (1995), Uso do Agregado Calcário na Fabricação de Concreto Asfáltico, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande/PB.

- COELHO, V., (1992), Considerações Sobre o Método Marshall, 26ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPV, Aracaju/SE.
- COELHO, V., QUEIROZ, R.C., (1992), Análise Crítica do Método Marshall, 11º Encontro de Asfalto-IBP, Rio de Janeiro/RJ.
- COELHO, V., SÓRIA, M. H. A., (1992), Variabilidade dos Resultados do Método Marshall, 11º Encontro de Asfalto-IBP, Rio de Janeiro/RJ.
- COELHO, V., SÓRIA, M. H. A., (1996), Influência da Composição Granulométrica de Agregados, nas Faixas “B” e “C” da ABNT, na Estabilidade Mecânica de Misturas Asfálticas Preparadas a Quente, 30ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPV, Salvador/BA.
- CORPS OF ENGINEERS – Department Of The Army, (1948), Investigation of the Design and Control of Asphalt Paving Mixtures: Technical Memorandum N° 3-254, Vicksburg, 3V, Mississippi, EUA., Apud COELHO (1992).
- DER-Departamento de Estradas de Rodagens do Estado do PERNAMBUCO, (1994), Especificações Gerais, Pavimentação, Asfalto Modificado Com Polímero, DERPE-ES-M.
- DNER-Departamento de Estradas de Rodagem, (1981), Asfaltos e Misturas Asfálticas, Curso AM 8, Módulo AM8.1, Materiais Asfálticos, Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico, Divisão de Capacitação Tecnológica.
- DNER-Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, (1994), Manual de Pavimentação (versão preliminar), Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico, Divisão de Capacitação Tecnológica.
- DNER-Departamento de Estradas de Rodagem, (1994), Método de Ensaio DNER-ME 138/94, Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Misturas Betuminosas, Rio de Janeiro/RJ.
- DNER-Departamento de Estradas de Rodagem, (1994), Método de Ensaio DNER-ME 133/94, Determinação do Módulo de Resiliência de Misturas Betuminosas, Rio de Janeiro/RJ.
- DNER-Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, (1998), Pesquisa de Asfaltos Modificados por Polímeros, Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico, Relatório Final (em fase de revisão), Volumes I, II e III, Rio de Janeiro/RJ.
- ENDERSBY, V. A., VALLERGA, B.A., (1952), Laboratory Compaction Methods and Their Effects on Mechanical Stability Tests For Asphaltic Pavements, Proceedings of

- Association os Asphalt Paving Technologists, Vol. 21: 298-348, Apud COELHO (1992).
- FARAH, H., SANTOS, R. G., (1987), Misturas de Látex com Ligantes Asfálticos, 22ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPv, Maceió/AL.
- FARAH, H., (1990), Camada Porosa de Atrito, 10^o Encontro de Asfalto-IBP, Rio de Janeiro/RJ.
- FREITAS, F. J. S., (1996), Asfalto Modificado com EVA, 30ª Reunião Anual de Pavimentação-RBPV, Salvador/BA.
- FROCHT, M. M., (1948), Photoelasticity, Vol. II, John Wiley & Sons, Inc. New York, NY.
- GOETZ, W. H., (1951), Comparison of Triaxial and Marshall Test Results, Proceedings of Association of asphalt Paving Technologists, Vol. 20: 200-245, apud COELHO (1992).
- GUIMARÃES, J. E. P., (1987), Correspondência Pessoal, Associação Brasileira dos Produtores de CAL-ABPC, São Paulo- SP, Apud MACÊDO (1989).
- LEITE, L. F. M., (1990), Caracterização Química dos Cimentos Asfálticos, Boletim Técnico Petrobrás, Rio de Janeiro/RJ.
- LEITE, L. F. M., CONSTANTINO, R. S., DUNLOP, M. S. & FIGUEREDO, M. A. G., (1995), Asfalto Modificado Por Polímero-Ligante Resistente à Formação de Trincas e Deformação Permanente, 29ª Reunião Anual de Pavimentação-RBPV, Cuiabá-MT.
- MACÊDO, J. A. G., (1989), Estudo das Características Físicas e Mecânicas de Agregados Graúdos Convencional e não Convencionais Visando Suas Aplicações em Concreto Betuminoso Usinado à Quente, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande/PB
- MACÊDO, M. M. D., MONTENEGRO, F. G. & MARTINHO, F. G., (1995), Borracha Termoplástica Modifica Asfaltos para Pavimentação, 29ª Reunião Anual de pavimentação-ABPv, Cuiabá/MT.
- MANO, E. B., (1986), Introdução a Polímeros, Edgard Blucher Ltda., São Paulo-SP.
- MARTIN, J. R., WALLACE, H. A., (1958), Design And Construction of Asphalt Pavements, McGraw-Hill Book Company Inc, USA.
- MARTINHO, F.G., (1993), Misturas de Asfálticas com Polímero na Pavimentação Urbana, 4ª Reunião de Pavimentação Urbana-ABPV, Maceió/AL.
- MARTINHO, F. G., MONTENEGRO, F. G. & TRAJANO, L., (1994), Coperflex Asphalt – Uma combinação Asfalto e Elastômero, 12^o Encontro de Asfalto-IBP, R. de Janeiro/RJ.

- MARTINHO, F. G., GUARÇONI, D. S., RAMOS, C. R. & PINTO, S., (1995), Asfalto Modificado com Polímeros, Informativo o ASFALTO-IBP, Nº 1, Rio de Janeiro/RJ, p. 1-8
- MEDINA, J., 1997, Mecânica dos Pavimentos, Editora UFRJ, Rio de Janeiro/RJ.
- MEDINA, J., MOTTA, L. M. G., PINTO, S. & LEITE, L. M., (1990), Um Estudo de Fadiga de Misturas Asfálticas com Seis Cimentos Asfálticos da PETROBRÁS, 10º Encontro de Asfalto-IBP, Rio de Janeiro/RJ.
- METCALF, C. T., (1959), Use of Marshall Stability Test in Asphalt Paving Mix Design, Washington, D. C., EUA, HRB, Bulletin 234, p. 12-22, Apud COELHO (1992).
- MOREIRA, C. C., (1994), Análise e Descrição de Procedimentos da Proposição de Método de Dosagem Marshall para Mistura Betuminosas Tipo C.B.U.Q., 12º Encontro de Asfalto-IBP, Rio de Janeiro/RJ.
- MOTTA, L. M. G., PINTO, S., (1994), O Uso de Ensaios Estáticos na Definição de Parâmetros de Comportamento das Misturas Asfálticas, 12º Encontro de Asfalto-IBP, Rio de Janeiro/RJ.
- MOTTA, L. M. G., MEDINA, J., CRUZ, A., M. & VIANA, (1992), Aspectos do Comportamento das Misturas Asfálticas, 11º Encontro de Asfalto-IBP, R. de Janeiro/RJ
- MOTTA, L. M. G., SÁ, M. F. P., OLIVEIRA, P. M. F. & SOUZA, A. M., (1996-a), O Ensaio de Creep Estático e Dinâmico na Avaliação das Misturas Asfálticas, 30ª Reunião Anual de Pavimentação, Salvador/BA.
- MOTTA, L. M. G., TONIAL, I., LEITE, L. M., CONSTANTINO, R. S., (1996-b), Princípios do Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas, Tradução Comentada, IBP.
- NEDER, E. E., Ng, T. & STRODER, M., (1996), Agentes de Adesão para Misturas Asfálticas Betuminosas, 30ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPv, Salvador/BA.
- NETTERBERG, F., (1971), Calcrete in Road Construction, National Institute For Transport and Road Research- NITRR, Bulletin 10, Pretória-South Africa. Apud COELHO (1995).
- O'FLAHERTY, C. A., (1974), Highway Engineering, Vol. 2. Edward Arnold(Publishers) Ltda., London, Apud MACÊDO (1989).
- OGURTSOVA, J., (1992), Dosagem de Concreto Asfáltico Usinado a Quente, 26ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPv, Aracaju/SE.

- OLIVEIRA, P.M.F., (1997), Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas Preparadas com Asfalto Polímero, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói/RJ, 190p.
- PERISSÉ, J. B., KLEIN, S. L., SANTOS, C. A. M. & REIS, M., (1994), Avaliação do Índice de Suscetibilidade Térmica para Asfalto da Reduc, 12^o Encontro de Asfalto-IBP, Rio de Janeiro/RJ.
- PINTO, S., (1991), Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicações na Avaliação Estrutural de Pavimentos, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ.
- POIRIER, J. E., CHAPPAT, M., BEAUVERDE, J., (1991), Pour le Client Seul Complete le Resultad, RGRA N^o 688, Apud SALATHÉ et alii (1992).
- PREUSSLER, E. S., (1983), Estudo da deformação Resiliente de Pavimentos Flexíveis e Aplicação ao Projeto de Camadas de Reforço, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 266p.
- PREUSSLER, E. S., PINTO, S., (1983), Aplicação do Método para Projeto de Reforço de Pavimentos Flexíveis Considerando a Resiliência, 18^a Reunião Anual de Pavimentação-ABPv, Porto Alegre/RS.
- REIS, R. M. M., (1995), Asfalto Modificado com Polímeros, Tecnologia de Ponta Para Prolongar a Vida dos Pavimentos Asfálticos, 6^a Reunião de Pavimentação Urbana-ABPv, Santos-SP.
- SALATHÉ, J. E., RAMOS, C. R., MARTINHO, F. G., GOMES, A., SANTANA, H. & GUARÇONI, D., (1990), Pesquisa do IPR Sobre Asfaltos Modificados com Polímeros, 10^o Encontro de Asfalto-IBP, Rio de Janeiro/RJ.
- SALATHÉ, J. E., RAMOS, C. R., MARTINHO, F. G. & GUARÇONI, D. S., (1992), Asfalto Modificado com Polímero, 11^o Encontro de Asfalto-IBP, Rio de Janeiro-RJ.
- SANTANA, H., (1993), Manual de Pré-Misturados a Frio, IBP-Instituto Brasileiro de Petróleo, Rio de Janeiro/RJ
- SANTANA, H., GONTIJO, P. R. A., (1984), Seleção dos Tipos de CAP Necessários à Pavimentação no Brasil, 19^a Reunião Anual de Pavimentação-ABPv, R. de Janeiro/RJ.
- SANTANA, H., SALATHÉ, J. E.,(1990), Os asfaltos-Polímeros e o Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos, 10^o Encontro de Asfalto-IBP, Rio de Janeiro/RJ.
- SANTO, N. R. E., REIS, R. M. M., (1992), Camada Drenante com a Utilização de Asfalto Modificado com Polímero, 11^o Encontro de Asfalto-IBP, Rio de Janeiro/RJ.

- SILVA, E. A., NEYRET, A., PETERLI, Z. & LEAL, M.B., (1996), Concretos Poliméricos, 30ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPv, Salvador/BA.
- SOARES, J. B., MOTTA, L. M. G., NÓBREGA, L. M., LEITE, L. M., PAIVA, J. A. A., JÚNIOR, E. F. N., (1998), Estudo Comparativo de Cimentos Asfálticos de Petróleo na Pista Experimental do Ceará, XII ANPET-Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Fortaleza/CE.
- SOUZA, M. L., (1976), Pavimentação Rodoviária,, Instituto de Pesquisa Rodoviário-IPR/DNER, vol. I, Rio de Janeiro/RJ.
- SOUZA, M. L., (1980), Pavimentação Rodoviária, Instituto de Pesquisa Rodoviário-IPR/DNER, Livros Técnicos e Científicos, 2ª Edição, Rio de Janeiro/RJ.
- TONIAL, I., LEITE, L., (1994), Qualidade dos Cimentos Asfálticos Brasileiros Segundo as Especificações SHRP, 12º Encontro de Asfalto-IBP, Rio de Janeiro/RJ.
- VIAPOL-IMPERMEABILIZANTES, (1997), Mantas Impermeabilizantes à Base de Asfalto Modificado com Polímeros APP (polipropileno atático) ou SBS (copolímero-estireno butadieno estireno), Catálogos Informativos, São Paulo/SP.
- VIEIRA, S., (1998), Introdução à Bioestatística, 3ª Edição, Revista Ampliada, Editora Campos, Rio de Janeiro/RJ.
- VISSER, A T., MORAIS, G. P. (1984), A State of the Art Review of Factors That Effectthe Skid Resistance of Roads and Artifields , Anual Transportatition Convention (ATC 1984), National Institute for Transport and Road Research – NITRR, Pretoria, South Africa, Apud COÊHLO (1995).
- WISNIEWSKI, B., (1986), Experiência com um Novo Ligante Asfáltico de Polímero Modificado para Aplicações em Capas Selantes em Rodovias de Tráfego Pesado, 8º Encontro de Asfalto-IBP, Rio de Janeiro/RJ.

6.2) BIBLIOGRAFIA - OBRAS CONSULTADAS

- BARBOSA, R. C., (1984), Caracterização do Asfalto por suas Propriedades Físicas: Diagramas, 19ª Reunião Anual de Pavimentação-RBPv, Rio de Janeiro/RJ.
- BERNUCCI, L. B., CAMPOS, O. S., DOMINGUES, F. A. A., CASTRO NETO, A. M., RABAÇA, S. R. & FELTRIN, C., (1996), Estudos para Formulação de CBUQ Considerando a Deformação Permanente para as Rodovias da rede DERSA, 30ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPv, Salvador/BA.
- BIRMAN, S., (1985), Especificação de Cimentos Asfálticos de Petróleo, 20ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPv, Fortaleza/CE.
- BIRMAN, S., (1994), O Estado de Arte do Controle Tecnológico de Concreto Asfáltico, no Brasil, 5ª Reunião de Pavimentação Urbana-ABPv, Natal/RN
- CARSWELL, P. J., BURGOS, F. C., (1997), Misión y Ventajas de los Betune Modificados com Polímeros, Revista RUTAS, Nº 63, Madrid-Espanha, p. 33-39.
- CARVALHO, J. B. Q., BRASILEIRO, F. E. & COÊLHO, R. M. G., (1996), Uso de Calcários em Concreto Asfáltico: Análise Econômica, 30ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPv, Salvador/BA.
- DER-Departamento de Estradas de Rodagem do Estado da PARAÍBA, (1997), Grupo de Gerência de Pavimentos, Sistema de Gerência de Pavimentos, Curso de Avaliação de Pavimentos, João Pessoa/PB.
- DIANI, E., GARGANI, L., (1988), Gomme Termoplastiche Tireniche Per la Modifica Dei Bitumi Nelle Pavimentazioni Stadrali, L'Industria Della Goma, vol. 32, Nº 2, p 27-34.
- DNER-Departamento de Estradas de Rodagem, (1964), Método de Ensaio DNER-ME 43-64, Ensaio MARSHALL para Misturas Betuminosas, Rio de Janeiro/RJ.
- DNER-Departamento de Estradas de Rodagem, (1994), Curso SR 6, Supervisão de Obras Rodoviárias, Diretoria de Des. Tecnológico, Divisão de Capacitação Tecnológica.
- GOODRICH, J. L., (1988), Asphalt And Polymer Modified Asphalt Properties Related to the Performance of Asphalt Concret Mixes, Asphalt Paving Technology, Proceedings Association of Asphalt Paving Technologist-Technical Sessions, Vol.57, p. 116-175, California-EUA.
- GRACIA, J. G., AMICH, R. R., (1998), Los Ligantes Modificados en las Carreteras Españolas de los Años 90, revista RUTAS, Nº 69, Madrid-Espanha, p. 5- 41.

- GUAZZELLI, J. L. C., CASTRO, A. M., (1984), Dificuldade na Compactação de Concreto Asfáltico Produzido com CAP-50/60, 19ª Reunião Anual de Pavimentação-RBPv, Rio de Janeiro/RJ.
- JONGE, F., VONK, W.C., (1994), Road Building Emulsions From Bitumens Modified With Thermoplastic Rubber, 12º Encontro de Asfalto-IBP, Rio de Janeiro/RJ.
- JÚNIOR, F.A., GIAMPAGLIA, H. R., (1985), Estudo em Laboratório, de Reciclagem de Misturas Betuminosas à Quente, 20ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPV, Fortaleza/CE.
- KRAUS, G., (1982), Modification of Asphalt by Block Copolymers of Butadien and Styrene, p. 1-14, ACS, Philadelphia-EUA.
- MACÊDO, J. A. G., LUCENA, F. B. & HEBER, C. F., (1987), Degradação de Agregados em Concreto Betuminoso Usinado a Quente, 22ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPV, Maceió/AL
- MACÊDO, J. A. G., (1996), Interpretação de Ensaio Deflectométricos para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 372p.
- MOREIRA, C. C., (1994), Interdependências das Características Físicas das Misturas Betuminosas Tipo C.B.U.Q., 28ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPV, Belo Horizonte-MG.
- MOREIRA, C. C., (1994), Proposição do Método de Dosagem Marshall para Mistura Betuminosas Tipo C.B.U.Q., 28ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPV, Belo Horizonte/MG.
- MARTINHO, F. G., 1992, Adesividade, 26ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPV, Aracaju/SE.
- MARTINHO, F. G., 1992, Minha Visão do CAP, 26ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPV, Aracaju/SE.
- MEDINA, J., (1988), Notas Históricas Acerca de Mecânica dos Pavimentos, 23ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPV, Florianópolis/SC.
- MEDINA, J., MOTTA, L. M. G., PINTO, S. & LEITE, L. M., (1990), Um Estudo de Fadiga de Misturas Asfálticas com Seis Cimentos Asfálticos da PETROBRÁS, 10º Encontro de Asfalto-IBP, Rio de Janeiro/RJ.
- MOMM, L., DOMINGUES, F. A. A., (1996), Efeitos da Gradação dos Agregados nas Misturas Asfálticas, 30ª Reunião de Anual de Pavimentação-ABPV, Salvador/BA.

- MOTTA, L. M. G., FILHO, S. R., (1984), Estudo do Dimensionamento de um Pavimento de Aeroporto Utilizando o Conceito de Fadiga, 19ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPv, Rio de Janeiro/RJ.
- MOTTA, L. M. G., MEDINA, J., (1986), A Questão da Influência da Temperatura na Deformabilidade Elástica dos Pavimentos Flexíveis, 21ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPv, Salvador/BA.
- MOTTA, L. M. G., (1991), Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis: Critério de Confiabilidade e Ensaio de Carga Repetidas, Tese de Doutorado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro/RJ.
- MOTTA, L. M. G., MEDINA, J., CRUZ, A. M. S. & VIANNA, A. A. D., (1992), Aspectos do Comportamento das Misturas Asfálticas, 11º Encontro de Asfalto-IBP, Rio de Janeiro/RJ.
- PINTO, S. & PREUSSLER, E. S., (1980), Módulos Resilientes de Concretos Asfálticos, Instituto de Pesquisas Rodoviário-IPR/DNER, Rio de Janeiro/RJ, p. 1-55.
- RAMOS, C. R., GUARÇONI, D. S. & MARTINHO, F. G., (1995), Curso de Química de Asfalto, Instituto Brasileiro de Petróleo-IBP, São Paulo/SP.
- ROAD RESEARCH LABORATORY- RRL, (1962), Bituminous Materials in Road Construction, Her Majesty's Stationery Office, London.
- SANTANA, H., GONTIJO, P. R. A., (1985), A Tendência Atual do Dimensionamento dos Pavimentos Flexíveis Rodoviário no Brasil, 20ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPv, Fortaleza/CE.
- SANTANA, H., GONTIJO, P. R. A., (1987), As Novas Especificações Brasileiras para Cimentos Asfálticos, 22ª Reunião Anual de Pavimentação-ABPv, Maceió/AL.
- SENÇO, W., (1980), Pavimentação, 3ª Edição Revista e Ampliada, Grêmio Politécnico, São Paulo/SP.
- SENÇO, W., (1997), Manual de Técnicas de Pavimentação, Editora Pini, Volume 1, São Paulo/SP.
- SHREVE, R. N., BRINK, J. A., (1977), Indústria de Processos Químicos, Tradução: MACÊDO, H., 1980, Instituto de Química, UFRJ, 4ª Ed., Editora Guanabara Dois S. A., Rio de Janeiro/RJ.
- SOUZA, C. S., CERATTI, J. A. & PETRUCCI, C., (1994), Caracterização do Comportamento Mecânico de Concreto Asfalto com Asfalto Modificado Tipo Betuflex, 12º Encontro de Asfalto-IBP, Rio de Janeiro/RJ.

- SOUZA, M. A., RAMOS, C. R., GUARÇONI, D. S., MOTTA, L. M. G. & LAO, V. L. E. S., (1995), Curso de Técnicas de Laboratório em Ligantes e Misturas Asfálticas, IBP-Instituto Brasileira de Petróleo, Rio de Janeiro/RJ.
- TONIAL, I., LEITE, L., (1994), Cimento Asfalto de Petróleo: Produção, Fornecimento, Transporte, Estocagem e Qualidade, 5ª Reunião de Pavimento Urbana-ABPv, Natal/RN.
- WHITE, T. D., (1985), Marshall Procedures For Design And quality Control of Asphalt Mixtures, Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 54, p 265-284.
- WHITHEOAK, D., (1990), CAP Modified Bitumens, SHELL Bitumens Handbook, Inglaterra, p. 149-169
- YODER, E. J., WITCZAK, M. W., (1975), Principles of Pavement Design, 2 Ed., John Willey & Sons, New York.

APÊNDICE - A

TRECHOS EXPERIMENTAIS NO BRASIL

No Brasil, os estudos de asfalto-polímero foram iniciados em 1968 com a adição de látex SBR. Posteriormente foram executados estudos e trechos experimentais, contudo sem o monitoramento adequado. A relação abaixo, mostra os tipos de polímeros e misturas utilizadas em trechos experimentais:

→ 1969 – trechos com látex SBR, nas ruas internas da Petroflex, na Bahia;

→ 1976 – trechos com látex, em Belford Roxo;

→ década de 70 – Ponte Rio-Niterói, com asfalto-epoxi no vão central;

Via Dutra, com asfalto-epoxi;

→ 1982 – Ponte Rio-Niterói, lama asfáltica com SBR;

→ 1983 – trecho na Rio-Petrópolis, com Petrolatex S-62, em revestimento tipo CBUQ;

trecho na RJ-104 de Niterói à Nova Friburgo, com látex em CBUQ;

pista externa da Praia de Copacabana, CBUQ com látex;

Ponte Rio-Niterói, lama asfáltica com látex;

→ 1984 – Aeroporto Santos Dumont, com SBR em emulsão asfáltica, nas juntas de dilatação;

Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro (Galeão), com SBR (membrana asfáltica elastomérica), nas pistas auxiliares;

→ 1988/1990 – estudo de Asfalto Modificado por Polímero realizado pelo IPR;

- 1990 – trecho experimental com mistura densa e drenante na rua Leopoldo Bulhões, com SBS e EVA, construído no estudo realizado pelo IPR;
- 1992 – trecho na rodovia dos Bandeirantes, com SBS (Betuflex);
- 1993 – trecho na PE-75 (Pernambuco) com SBS em CBUQ;
no estado do Paraná, em corredores de ônibus, com SBS;
- 1994 – trecho na PE-74 (Pernambuco) com SBS em CBUQ;
- 1995 – Autódromo de Interlagos, nas curvas de Fórmula I,
- Autódromo de Jacarepaguá, com SBS, fórmula I;
- 1996 – Autódromo de Jacarepaguá, com SBS, Fórmula Indy.

Após o período de pesquisa e avaliações a nível de laboratório por pesquisadores do IPR/IPIRANGA/CENPES/PETROFLEX/COPERBO além de outros, onde foram estudados os agregados, os asfaltos, os diversos tipos de polímeros disponíveis no mercado nacional e a compatibilização do asfalto com polímeros, chegou-se a seleção dos materiais poliméricos (SBS e EVA), que poderiam apresentar resultados satisfatórios e com algumas vantagens nesta misturas com asfalto modificados.

Tornou-se então indispensável um confronto com os resultados práticos, obtidos a partir da execução de trecho experimental onde, presentes o tráfego e o intemperismo, obter-se-ia informações adicionais àquelas conseguidas em laboratório. Embora nota-se que os acompanhamentos nestes trechos experimentais não têm sido de forma sistemática, percebido através dá não divulgação de resultados de monitoramentos.

APÊNDICE – B

FOTOS DE TRECHOS EXPERIMENTAIS NAS RODOVIAS PE-74 e PE-75



Figura B1*: Foto de um trecho experimental (Em 1997) com asfalto polímero(SBS) em mistura tipo CBUQ, na rodovia PE-75 de base estabilizada granulometricamente, realizado em 1993.



Figura B2*: Foto de um trecho experimental (1997) com asfalto polímero (SBS) em mistura tipo CBUQ, na rodovia PE-74 de base estabilizada solo-cimento, realizado em 1994.

*Essas fotos são de dezembro/1997 em visita realizada com o objetivo de fazer observações visuais e verificar o comportamento dos trechos, onde mostram pequenas fissuras locais, mas de uma maneira geral apresentavam-se de forma satisfatórios.

APÊNDICE - C

ESPECIFICAÇÕES PARA O CAP PURO E CAP POLIMERIZADO

Tabela C1: Especificação do CAP classificado por penetração

CARACTERÍSTICAS	MÉTODOS DE ENSAIO		PENETRAÇÃO		
	ABNT	ASTM	30/45	50/60*	85/100
Penetração(100g, 5s, a 25 ^o C), 0,1mm, mín.	MB-107	D 5	30-45	50-60	85-100
Ponto de Fulgor, ^o C, mín.	MB-50	D 92	235	235	235
Ductibilidade a 25 ^o C, cm, mín.	MB-167	D 113	60	60	100
Viscosidade SF a 135 ^o C, cm, mín	MB-517	D 2170	110	110	85
Teor de Betume, % em peso, mín	MB-166	D 2042	99,5	99,5	99,5
Índice de suscetibilidade Térmica	---	---	-1,5 a +1	-1,5 a +1	-1,5 a +1

*Tipo de CAP utilizado nesta pesquisa

Tabela C2: Especificação do CAP classificado por viscosidade

CARACTERÍSTICAS	MÉTODOS DE ENSAIO		TIPOS DE CAP		
	ABNT	ASTM	CAP-7	CAP-20	CAP-40
Viscosidade a 60 ^o C, Poise	MB-827	D 2171	700a1500	2000a3500	4000a8000
Viscosidade SF a 135 ^o C, s, mín	MB-517	D 2170	100	120	170
Viscosidade SF a 177 ^o C, s,	MB-517	D 2170	15-60	30-150	40-150
Penetração(100g, 5s, a 25 ^o C), 0,1mm, mín.	MB-107	D 5	90	50	30
Ponto de Fulgor, ^o C, mín.	MB-50	D 92	220	235	235
Solubilidade em tricloroetileno % peso, mín.	MB-166	D 2042	99,5	99,5	99,5
Índice de suscetibilidade Térmica	---	---	-1,5 a +1	-1,5 a +1	-1,5 a +1

As especificações utilizadas por diferentes países da Europa e pelos Estados Unidos não concordam quanto aos valores típicos necessários a uma mistura asfalto-polímero. Já no Brasil, não existia especificações para este tipo de ligante, e só recentemente é que o DNER (1998) elaborou suas especificações para o asfalto modificado com polímero SBS.

Para a execução de um trecho experimental na rodovia PE-75 com asfalto modificado com polímero do tipo SBS, o DER-PE elaborou especificações gerais para o asfalto modificado com o código de DERPE-ES-M. As características dos ligantes asfálticos modificados com polímeros do tipo elastômeros termoplásticos, obedeceram os seguintes limites indicados:

→ Penetração (100g, 5 Seg., 25 ^o C, 0,1mm).....	Mínimo (0,1mm): 50
.....	Máximo (0,1mm): 70
→ Ponto de Amolecimento (°C).....	Mínimo (°C): 60
→ Índice de Pfeiffer (IP).....	Mínimo (IP): +1
→ Intervalo de Plasticidade (°C).....	Mínimo (°C): 81
→ Recuperação Elástica (25 ^o C, 20cm).....	Mínimo (%): 80
→ Ductibilidade (25 ^o C).....	Mínimo (cm): 50
→ Ponto de Fulgor (°C).....	Mínimo (°C): 260
→ Viscosidade SF a 135 ^o C.....	Mínimo (SSF): 100
→ Viscosidade SF a 177 ^o C.....	Mínimo (SSF): 30
.....	Máximo (SSF): 150
→ Estabilidade a 7 dias (variação do Ponto de Amolecimento)	Máximo (°C): 7

As especificações de serviço de pavimentação contemplando asfalto modificado por polímeros, em concreto asfáltico, proposto pelo DNER e apresentado em relatório de pesquisa de asfalto modificado por polímero (1998). Apresenta-se também no mesmo relatório, os seguintes métodos de ensaios de asfalto polímero: recuperação elástica, desgaste por abrasão de mistura betuminosa com AMP (ensaio Cantabro) e estabilidade ao armazenamento do asfalto polímero.

Tabela C3: Especificação de asfalto modificado por polímero SBS (DNER, 1998)

CARACTERÍSTICA	EXIGÊNCIA	
	Minima	Máxima
Penetração, 100g, 5s, 25 ^o C, 0,1mm	45	90
Ponto de Fulgor, ^o C	235	-
Ductibilidade, 25 ^o C, 5cm/min., cm	100	-
Densidade Relativa, 25 ^o C/25 ^o C	1,00	1,05
Ponto de Amolecimento, ^o C	60	85
Ponto de Ruptura Fraass, ^o C	-	-13
Recuperação Elástica, 20cm, 25 ^o C, %	85	-
Viscosidade Cinemática, 135 ^o , Cst	850	-
Viscosidade Cinemática, 155 ^o C, Cst	350	-
Estabilidade ao Armazenamento: 500ml em estufa a 163 ^o C, 5 dias:		
- diferença de ponto de amolecimento, ^o C	-	2
- diferença de recuperação elástica, 20cm, 25 ^o C, %	-	3
Índice de Suscetibilidade térmica(ISTx10 ²) (*)	2	5
Efeito de Calor e Ar:		
- variação de massa, %	-	1,0
- percentagem da penetração original	50	-
- variação do ponto de amolecimento, ^o C	-	4
- recuperação elástica, %	80	-

(*) – O índice de suscetibilidade térmica (IST), deve ser determinado a partir da inclinação da reta penetração versus temperatura, para 15, 20, 25, 30 e 35^oC. A inclinação da reta é determinada pelo ajuste da equação $\log(\text{pen})=C+AT$, onde: A=inclinação da reta, C=constante e T=temperatura em ^oC.

APÊNDICE - D

ESTIMATIVAS DE CUSTOS FINAIS DE ASFALTO POLÍMERO (SBS) PARA UMA PRIMEIRA APROXIMAÇÃO (DNER/1998)

Tabela D1: Preço para Massa Asfáltica: Asfalto Convencional x Modificado por SBS

COMPOSIÇÃO DE PREÇO				R\$/ tonelada de massa asf.	
MATERIAL	UNIDADE	QUANT.	PREÇO UNIT.	CAP	CAP+SBS
BRITA 1	m ³	0,26	25,00	6,50	6,50
BRIATA 0	m ³	0,17	22,00	3,74	3,74
PO-DE-PEDRA	m ³	0,22	14,00	3,08	3,08
FILER (CPE)	kg	28,0	0,12	3,36	3,36
CAP 20	t	0,052	208,00	10,82	-
CAP 20+4%SBS	t	0,052	420,00	-	21,84
TOTAL (R\$)				27,50	38,52

Notas: 1) O preço do asfalto modificado foi informado pelo fabricante (Ipiranga). Os demais foram cotados na EMOP (Rio de Janeiro/Fevereiro de 1998);

2) Incluído o custo de transporte dos materiais do fornecedor à usina.

OBS.: O consumo de cada material necessário para a confecção de 1 (uma) tonelada de massa asfáltica foi proporcional ao verificado nos projetos de misturas desenvolvidos na pesquisa (DNER/1998).

Um fator decisivo para a viabilidade econômica no emprego do asfalto modificado com polímero é a determinação da espessura equivalente. Resultados práticos têm mostrado que o revestimento com asfalto modificado, permite obter misturas que possibilitam a redução de espessura em torno de 40% em relação ao convencional (MARTINHO, 1993), embora saiba que isto dependa de muitos fatores.

Tabela D2: Composição de Preço Relativo à Usinagem, Espalhamento e Compactação

DESCRIÇÃO	UNID	QUANT. ⁽³⁾	PREÇO UNIT.	CAP	CAP+SBS
Usina de Asfalto	h	0,0167	389,20	6,50	7,15 ⁽⁴⁾
Carregador frontal (cp)	h	0,0140	32,44	0,45	0,45
Carregador frontal (ci)	h	0,0151	15,58	0,24	0,24
Vibroacabadora (cp)	h	0,0151	66,11	1,00	1,00
Vibroacabadora (ci)	h	0,0140	41,13	0,58	0,58
Rolo liso (cp)	h	0,0215	17,80	0,38	0,38
Rolo liso (ci)	h	0,0076	10,54	0,08	0,08
Rolo pneu (cp)	h	0,0093	29,19	0,27	0,27
Rolo pneu (ci)	h	0,0198	17,18	0,34	0,34
Laboratorista	h	0,0115	5,14	0,06	0,06
Servente	h	0,2244	2,54	0,57	0,57
Desg. de Ferramentas	%	5	-	0,52	0,56
TOTAL (R\$)				10,99	11,68

- Notas: 1) Composição de custo baseado nos parâmetros preconizados pela EMOP/RJ (inclusive preços);
- 2) Computado os custos referentes aos salários e encargos dos operadores;
- 3) Relativo a 1 (uma) tonelada de massa asfáltica executada;
- 4) Estimou-se um acréscimo de 10% em função da temperatura requerida para usinagem.

Observa-se na Tabela D2, que não há praticamente nenhuma alteração do custo quanto à usinagem e ao preço executivo (espalhamento e compactação), a diferença no custo final resume-se basicamente ao preço da massa asfáltica (Tabela D1), conforme discriminado abaixo:

❖ Revestimento com cimento asfáltico convencional = $(27,50 + 10,99) = \text{R\$ } 38,49/\text{t}$

❖ Revestimento com cimento asfáltico modificado = $(38,52 + 11,68) = \text{R\$ } 50,20/\text{t}$

APÊNDICE – E

ENSAIO DE TRILHA DE RODAS EM MISTURAS COM CAP PURO E POLIMERIZADO (CARSWELL et alii, 1997)



Figura E1: Resultados de ensaio de trilha de rodas em misturas com asfalto convencional, submetida ao tráfego a 60°C (Revista RUTAS Nº 63, 1997, p. 33-39)

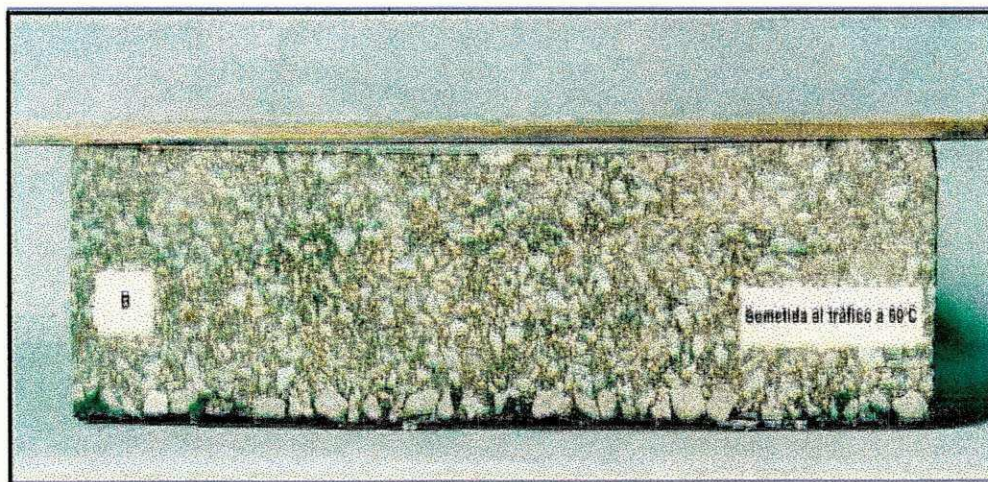


Figura E2: Resultados de ensaio de trilha de rodas em mistura com asfalto modificado por polímero, submetida ao tráfego a 60°C (Revista RUTAS, Nº 63, 1997, p. 33-39)

APÊNDICE - F

**RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA E
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ESTÁTICA DA PESQUISA EM ESTUDO**

ENSAIO DE MÓDULO RESILIENTE POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra: Folha:

Origem: Interessado:

Temperatura de ensaio (°C) Constante dos LVDTs: mm/mV

Operador(es): Data:

Calibração do cil. de carga:

Número do corpo de prova	Altura do C.P. (cm)	Pressão Manom. (kgf/cm ²)	OSCILÓGRAFO		Carga (kgf)	Deformação Resiliente (cm)	Módulo Resiliente (Mpa)	Módulo Resiliente Médio (Mpa)
			Registro (div)	Sens. (mV/div)				
2829	7,02	3,0	3,5	1	533,1	0,001244	3401	3135
		3,5	4,5	1	624,4	0,001600	3098	
		4,0	5,5	1	715,6	0,001955	2905	
2835	6,94	4,0	3,5	1	715,6	0,001244	4566	4194
		4,5	4,5	1	806,8	0,001600	4004	
		5,0	5,0	1	898,1	0,001778	4011	
2837	6,88	2,5	3,0	1	441,9	0,001067	3289	2933
		3,0	4,0	1	533,1	0,001422	2976	
		3,5	5,5	1	624,4	0,001955	2535	

OBSERVAÇÕES:

ENSAIO DE MÓDULO RESILIENTE POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra: CAP 50/60 + Polímero (50 golpes) Folha: 1/1

Origem: Laboratório - UFPB Interessado: M.Sc. João Carlos

Temperatura de ensaio (°C) 25 Constante dos LVDTs: 0,001778 mm/mV

Operador(es): Marcos Pereira Data: 12/02/99

Calibração do cil. de carga: $F_{(man. de 0-1)} = 145,09 Pm + 16,973 <> F_{(man. de 0-10)} = 182,47 - 14,267$

Número do corpo de prova	Altura do C.P. (cm)	Pressão Manom. (kgf/cm ²)	OSCILÓGRAFO		Carga (kgf)	Deformação Resiliente (cm)	Módulo Resiliente (Mpa)	Módulo Resiliente Médio (Mpa)
			Registro (div)	Sens. (mV/div)				
2852	6,85	2,5	3,5	1	441,9	0,001244	2889	2509
		3,0	5,0	1	533,1	0,001778	2440	
		3,5	6,5	1	624,4	0,002311	2198	
2860	6,78	3,0	2,5	1	533,1	0,000889	4880	4427
		3,5	3,0	1	624,4	0,001067	4763	
		4,0	4,5	1	715,6	0,001600	3639	
2861	6,86	4,0	4,5	1	715,6	0,001600	3639	3357
		4,5	5,0	1	806,8	0,001778	3693	
		5,0	7,5	1	898,1	0,002667	2740	

OBSERVAÇÕES:

ENSAIO DE MÓDULO RESILIENTE POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra: CAP 50/60 (75 golpes) Folha: 1/1

Origem: Laboratório - UFPB Interessado: M.Sc. João Carlos

Temperatura de ensaio (°C) 25 Constante dos LVDTs: 0,001778 mm/mV

Operador(es): Alvaro Dellê Data: 09/03/99

Calibração do cil. de carga: $F_{(man. de 0-1)} = 145,09 Pm + 16,973 <> F_{(man. de 0-10)} = 182,47 - 14,267$

Número do corpo de prova	Altura do C.P. (cm)	Pressão Manom. (kgf/cm ²)	OSCILÓGRAFO		Carga (kgf)	Deformação Resiliente (cm)	Módulo Resiliente (Mpa)	Módulo Resiliente Médio (Mpa)
			Registro (div)	Sens. (mV/div)				
2865	6,80	3,0	4,5	1	533,1	0,001600	2731	2443
		3,5	6,0	1	624,4	0,002133	2399	
		4,0	7,5	1	715,6	0,002667	2200	
2831	7,03	4,0	4,0	1	715,6	0,001422	3989	3556
		4,5	5,0	1	806,8	0,001778	3598	
		5,0	6,5	1	898,1	0,002311	3081	
2854	6,96	3,0	4,5	1	533,1	0,001600	2668	2509
		3,5	5,5	1	624,4	0,001955	2557	
		4,0	7,0	1	715,6	0,002489	2302	

OBSERVAÇÕES:

ENSAIO DE MÓDULO RESILIENTE POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra: CAP 50/60 + Polímero (75 golpes) Folha: 1/1

Origem: Laboratório - UFPB Interessado: M.Sc. João Carlos

Temperatura de ensaio (°C) 25 Constante dos LVDTs: 0,001778 mm/mV

Operador(es): Marcos Pereira Data: 12/02/99

Calibração do cil. de carga: $F_{(man. de 0-1)} = 145,09 Pm + 16,973 <> F_{(man. de 0-10)} = 182,47 - 14,267$

Número do corpo de prova	Altura do C.P. (cm)	Pressão Manom. (kgf/cm ²)	OSCILÓGRAFO		Carga (kgf)	Deformação Resiliente (cm)	Módulo Resiliente (Mpa)	Módulo Resiliente Médio (Mpa)
			Registro (div)	Sens. (mV/div)				
2862	6,73	3,0	3,5	1	533,1	0,001244	3548	3186
		3,5	4,5	1	624,4	0,001600	3232	
		4,0	6,0	1	715,6	0,002133	2778	
2867	6,77	2,5	4,0	1	441,9	0,001422	2573	2586
		3,0	4,5	1	533,1	0,001600	2760	
		3,5	6,0	1	624,4	0,002133	2424	
2870	6,87	4,0	3,0	1	715,6	0,001067	5556	4639
		4,5	4,5	1	806,8	0,001600	4176	
		5,0	5,0	1	898,1	0,001778	4184	

OBSERVAÇÕES:

**RESULTADOS DOS CP's DA TESE DE MESTRADO
DE JOÃO CARLOS - UFPB - σ**

CP_{PROJ}	h_{média}	ϕ_{médio}	D_{ap}	σ_{médio} (Mpa)	TIPO	σ (kgf/cm²)	σ (Mpa)
05	6,90	10,17	2,20	1,00	50/60 (50 golpes)	10,49	1,03
08	6,97	10,18	2,18			9,90	0,97
10	6,99	10,17	2,19			10,08	0,99
15	6,91	10,16	2,19	0,94	50/60 (75 golpes)	9,27	0,91
16	6,87	10,18	2,20			10,15	1,00
17	7,09	10,18	2,17			9,27	0,91
24	6,82	10,17	2,19	1,12	50/60 + polímero (50 golpes)	não considere	muito baixo
26	6,87	10,16	2,20			10,89	1,07
28	6,92	10,19	2,20			12,04	1,18
33	6,81	10,18	2,20	1,18	50/60 + polímero (75 golpes)	não considere	não considere
37	6,81	10,17	2,20			13,16	1,29
40	6,95	10,16	2,17			11,00	1,08