



PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

• Formação Básica para Engenheiros •

Liedi Bariani Bernucci

Laura Maria Goretti da Motta

Jorge Augusto Pereira Ceratti

Jorge Barbosa Soares

Currículo resumido dos professores do PROASFALTO:



Laura Maria Goretti da Motta

Engenheira Civil (1976), pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Mestre em Engenharia Civil (1979), pela Coordenação dos Programas de Pós-graduação em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Doutora pela COPPE/UFRJ, 1991. Professora Adjunta do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ desde 1984. Coordena desde 1994 o Setor de Pavimentos do Laboratório de Geotecnia da COPPE. É membro da Comissão de Asfaltos do Instituto Brasileiro do Petróleo e Gás. Possui diversos trabalhos publicados no Brasil e exterior. Já orientou mais de 50 mestres e doutores. Já atuou em mais de 40 projetos de cooperação com empresas e órgãos do setor de pavimentação.



Liedi Bariani Bernucci

Engenheira Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (1981), especialização no Instituto de Geotécnica da Escola Politécnica Federal de Zurique na Suíça (1984 e 1985), Mestre em Engenharia de Solos pelo Departamento de Estruturas e Geotécnica da EPUSP (1987), estágio de Doutorado pelo Instituto de Geotécnica da Escola Politécnica Federal de Zurique, na Suíça (1987 e 1988), Doutora em Engenharia de Transportes pelo Departamento de Engenharia de Transportes da EPUSP (1995), Livre-Docente em Engenharia de Transportes pela EPUSP (2001). Professora Titular no Departamento de Engenharia de Transportes da EPUSP, Coordenadora do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da EPUSP e Chefe do Departamento de Engenharia de Transportes da EPUSP, atua como docente em graduação e pós-graduação, como coordenadora de diversos projetos de pesquisa e extensão. É membro da Comissão de Asfaltos do Instituto Brasileiro do Petróleo e Gás. É consultora em pavimentação, possui diversas publicações e já formou diversos mestres e doutores em Transportes.



Jorge Barbosa Soares

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (1992). Mestre (1994) e Ph.D. (1997) em Engenharia Civil pela Texas A&M University. Coordenador da Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da UFC. Coordenador do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da UFC e da REDE ASFALTO N/NE. Professor Associado do Departamento de Engenharia de Transportes da UFC, atua como docente em graduação e pós-graduação e na coordenação de projetos de pesquisa e capacitação junto a agências de fomento, empresas e órgãos do setor de pavimentação. É membro da Comissão de Asfaltos do Instituto Brasileiro do Petróleo e Gás. Atua também como consultor e possui diversas publicações nos principais periódicos e congressos técnico/científicos nacionais e internacionais na área de pavimentação.



Jorge Augusto Pereira Ceratti

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 1976, Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 1979. Doutor em Engenharia Civil pela Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), 1991. Professor Associado no Departamento de Engenharia Civil da UFRGS, onde atua como docente em graduação e pós-graduação, tendo formado, desde 1981, diversos mestres e doutores em Engenharia Civil. Coordenador do Laboratório de Pavimentação da UFRGS. É membro da Comissão de Asfaltos do Instituto Brasileiro do Petróleo e Gás. Atua como consultor em pavimentação, desenvolvendo projetos de cooperação com empresas e órgãos do setor de pavimentação. Possui diversas publicações nos principais periódicos e congressos técnico/científicos, nacionais e internacionais, na área de pavimentação.

Pavimentação asfáltica

Formação básica para engenheiros

Liedi Bariani Bernucci
Laura Maria Goretti da Motta
Jorge Augusto Pereira Ceratti
Jorge Barbosa Soares

Rio de Janeiro
2008

4ª. Reimpressão – ABEDA
2010



ASFALTOS



PATROCINADORES

Petrobras – Petróleo Brasileiro S. A.

Abeda – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos

Copyright © 2007 Liedi Bariani Bernucci, Laura Maria Goretti da Motta,
Jorge Augusto Pereira Ceratti e Jorge Barbosa Soares

COORDENAÇÃO DE PRODUÇÃO

Trama Criações de Arte

PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO

Anita Slade

Sonia Goulart

DESENHOS

Rogério Corrêa Alves

REVISÃO DE TEXTO

Maríflor Rocha

CAPA

Clube de Idéias

IMPRESSÃO

Gráfica Imprinta

Ficha catalográfica elaborada pela Petrobras / Biblioteca dos Serviços Compartilhados

P338 Pavimentação asfáltica : formação básica para engenheiros / Liedi
Bariani Bernucci... [et al.]. – Rio de Janeiro : PETROBRAS: ABEDA,
2006.
504 f. : il.

Inclui Bibliografias.
Patrocínio PETROBRAS

1. Asfalto. 2. Pavimentação. 3. Revestimento asfáltico. 4. Mistura.
I. Bernucci, Liedi Bariani. II. Motta, Laura Maria Goretti da. III. Ceratti,
Jorge Augusto Pereira. IV. Soares, Jorge Barbosa.

CDD 625.85

APRESENTAÇÃO

Tendo em vista a necessidade premente de melhoria da qualidade das rodovias brasileiras e a importância da ampliação da infra-estrutura de transportes, a Petróleo Brasileiro S.A. e a Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos – Abeda vêm investindo no desenvolvimento de novos produtos asfálticos e de modernas técnicas de pavimentação. Para efetivamente aplicar estes novos materiais e a recente tecnologia, é preciso promover a capacitação de recursos humanos.

Assim, essas empresas, unidas em um empreendimento inovador, conceberam uma ação para contribuir na formação de engenheiros civis na área de pavimentação: o Proasfalto – Programa Asfalto na Universidade. Este projeto arrojado foi criado para disponibilizar material didático para aulas de graduação de pavimentação visando oferecer sólidos conceitos teóricos e uma visão prática da tecnologia asfáltica.

Para a elaboração do projeto didático, foram convidados quatro professores de renomadas instituições de ensino superior do Brasil. Iniciou-se então o projeto que, após excelente trabalho dos professores Liedi Bariani Bernucci, da Universidade de São Paulo, Laura Maria Goretti da Motta, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Jorge Augusto Pereira Ceratti, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e Jorge Barbosa Soares, da Universidade Federal do Ceará, resultou no lançamento deste importante documento.

O livro *Pavimentação Asfáltica* descreve os materiais usados em pavimentação e suas propriedades, além de apresentar as técnicas de execução, de avaliação e de restauração de pavimentação. A forma clara e didática como o livro apresenta o tema o transforma em uma excelente referência sobre pavimentação e permite que ele atenda às necessidades tanto dos iniciantes no assunto quanto dos que já atuam na área.

A Universidade Petrobras, co-editora do livro *Pavimentação Asfáltica*, sente-se honrada em participar deste projeto e cumprimenta os autores pela importante iniciativa de estabelecer uma bibliografia de consulta permanente sobre o tema.

Petróleo Brasileiro S.A. – Petrobras

Abeda – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos

SUMÁRIO

PREFÁCIO	7
1 Introdução	9
1.1 PAVIMENTO DO PONTO DE VISTA ESTRUTURAL E FUNCIONAL	9
1.2 UM BREVE HISTÓRICO DA PAVIMENTAÇÃO	11
1.3 SITUAÇÃO ATUAL DA PAVIMENTAÇÃO NO BRASIL	20
1.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	22
BIBLIOGRAFIA CITADA E CONSULTADA	24
2 Ligantes asfálticos	25
2.1 INTRODUÇÃO	25
2.2 ASFALTO	26
2.3 ESPECIFICAÇÕES BRASILEIRAS	58
2.4 ASFALTO MODIFICADO POR POLÍMERO	59
2.5 EMULSÃO ASFÁLTICA	81
2.6 ASFALTO DILUÍDO	96
2.7 ASFALTO-ESPUMA	97
2.8 AGENTES REJUVENESCEDORES	99
2.9 O PROGRAMA SHRP	100
BIBLIOGRAFIA CITADA E CONSULTADA	110
3 Agregados	115
3.1 INTRODUÇÃO	115
3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS	116
3.3 PRODUÇÃO DE AGREGADOS BRITADOS	124
3.4 CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS IMPORTANTES DOS AGREGADOS PARA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA	129
3.5 CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS SEGUNDO O SHRP	150
BIBLIOGRAFIA CITADA E CONSULTADA	154

4	Tipos de revestimentos asfálticos	157
4.1	INTRODUÇÃO	157
4.2	MISTURAS USINADAS	158
4.3	MISTURAS <i>IN SITU</i> EM USINAS MÓVEIS	185
4.4	MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS	188
4.5	TRATAMENTOS SUPERFICIAIS	191
	BIBLIOGRAFIA CITADA E CONSULTADA	200
5	Dosagem de diferentes tipos de revestimento	205
5.1	INTRODUÇÃO	205
5.2	DEFINIÇÕES DE MASSAS ESPECÍFICAS PARA MISTURAS ASFÁLTICAS	207
5.3	MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE	217
5.4	DOSAGEM DE MISTURAS A FRIO	253
5.5	MISTURAS RECICLADAS A QUENTE	256
5.6	TRATAMENTO SUPERFICIAL	263
5.7	MICRORREVESTIMENTO E LAMA ASFÁLTICA	269
	BIBLIOGRAFIA CITADA E CONSULTADA	281
6	Propriedades mecânicas das misturas asfálticas	287
6.1	INTRODUÇÃO	287
6.2	ENSAIOS CONVENCIONAIS	288
6.3	ENSAIOS DE MÓDULO	290
6.4	ENSAIOS DE RUPTURA	308
6.5	ENSAIOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE	316
6.6	ENSAIOS COMPLEMENTARES	327
	BIBLIOGRAFIA CITADA E CONSULTADA	332
7	Materiais e estruturas de pavimentos asfálticos	337
7.1	INTRODUÇÃO	337
7.2	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE BASE, SUB-BASE E REFORÇO DO SUBLEITO	339
7.3	MATERIAIS DE BASE, SUB-BASE E REFORÇO DO SUBLEITO	352
7.4	ALGUMAS ESTRUTURAS TÍPICAS DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	365
	BIBLIOGRAFIA CITADA E CONSULTADA	369
8	Técnicas executivas de revestimentos asfálticos	373
8.1	INTRODUÇÃO	373
8.2	USINAS ASFÁLTICAS	373

8.3	TRANSPORTE E LANÇAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	384
8.4	COMPACTAÇÃO	389
8.5	EXECUÇÃO DE TRATAMENTOS SUPERFICIAIS POR PENETRAÇÃO	393
8.6	EXECUÇÃO DE LAMAS E MICRORREVESTIMENTOS ASFÁLTICOS	397
8.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	401
	BIBLIOGRAFIA CITADA E CONSULTADA	402
9	Diagnóstico de defeitos, avaliação funcional e de aderência	403
9.1	INTRODUÇÃO	403
9.2	SERVENTIA	405
9.3	IRREGULARIDADE LONGITUDINAL	407
9.4	DEFEITOS DE SUPERFÍCIE	413
9.5	AVALIAÇÃO OBJETIVA DE SUPERFÍCIE PELA DETERMINAÇÃO DO IGG	424
9.6	AVALIAÇÃO DE ADERÊNCIA EM PISTAS MOLHADAS	429
9.7	AVALIAÇÃO DE RUÍDO PROVOCADO PELO TRÁFEGO	435
	BIBLIOGRAFIA CITADA E CONSULTADA	438
10	Avaliação estrutural de pavimentos asfálticos	441
10.1	INTRODUÇÃO	441
10.2	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO ESTRUTURAL	443
10.3	EQUIPAMENTOS DE AVALIAÇÃO ESTRUTURAL NÃO-DESTRUTIVA	445
10.4	NOÇÕES DE RETROANÁLISE	453
10.5	SIMULADORES DE TRÁFEGO	457
10.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	460
	BIBLIOGRAFIA CITADA E CONSULTADA	461
11	Técnicas de restauração asfáltica	463
11.1	INTRODUÇÃO	463
11.2	TÉCNICAS DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS COM PROBLEMAS FUNCIONAIS	466
11.3	TÉCNICAS DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS COM PROBLEMAS ESTRUTURAIIS	468
11.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE O TRINCAMENTO POR REFLEXÃO	469
	BIBLIOGRAFIA CITADA E CONSULTADA	475
	ÍNDICE DE FIGURAS	477
	ÍNDICE DE TABELAS	486
	ÍNDICE REMISSIVO DE TERMOS	490
	ÍNDICE REMISSIVO DAS BIBLIOGRAFIAS	496

PREFÁCIO

Este livro tem por objetivo principal contribuir para a formação do aluno na área de pavimentação asfáltica, dos cursos de Engenharia Civil de universidades e faculdades do país. O projeto deste livro integra o Programa Asfalto na Universidade, concebido em conjunto com a Petrobras e a Abeda, nossos parceiros e patrocinadores, para apoiar o ensino de graduação, disponibilizando material bibliográfico adicional aos estudantes e aos docentes de disciplinas de infra-estrutura de transportes. Os autores acreditam que seu conteúdo possa ser também útil a engenheiros e a técnicos da área de pavimentação e, no aspecto de organização do conhecimento, a pós-graduandos.

A elaboração deste livro em muito assemelha-se à construção de uma estrada, e os autores o vêem como mais uma via na incessante busca de novos horizontes. Estradas preexistentes influenciam o traçado de novas rodovias, assim como a preexistência de diversos materiais bibliográficos contribuiu para o projeto deste livro. Os autores procuraram ao máximo trafegar por diversas referências, devidamente reconhecidas no texto, e estão cientes de que muitos outros caminhos precisam ser percorridos para uma viagem mais plena.

Como em qualquer projeto de engenharia, decisões foram tomadas com vistas à delimitação do trabalho. Foram enfocados tópicos julgados menos disponíveis na literatura técnica brasileira sobre materiais de pavimentação – principalmente no que se refere aos ligantes asfálticos e aos tipos e propriedades das misturas asfálticas –, técnicas executivas e de avaliação de desempenho, bem como as diretrizes para a restauração asfáltica de pavimentos. Esses assuntos foram considerados pelos autores de grande valia para a construção do conhecimento sobre pavimentação na academia. Os autores reconhecem a limitação do escopo deste livro e recomendam fortemente que os estudantes busquem bibliografia complementar que enriqueça seus conhecimentos, enveredando também pelos caminhos do projeto de dimensionamento das estruturas de pavimentos e de restaurações, da mecânica dos pavimentos, da geotecnia, do projeto de tráfego e de drenagem, das técnicas de controle tecnológico, da gerência de pavimentos etc. Todas essas áreas do saber afins à pavimentação dão embasamentos aos conceitos necessários para termos pavimentos rodoviários, aeroportuários e urbanos mais econômicos, com melhor desempenho e mais duráveis para cada situação.

Como toda obra de pavimentação, não faltou neste caso a consultoria e o controle de qualidade, exercidos com competência e elegância pelos colegas aqui reconhecidos por seus valiosos comentários e sugestões: Dra. Leni Figueiredo Mathias Leite

e Eng. Luis Alberto do Nascimento (Centro de Pesquisa da Petrobras), Eng. Ilonir Antonio Tonial (Petrobras Distribuidora), Eng. Armando Morilha Júnior (Abeda), Prof. Dr. Glauco Túlio Pessa Fabbri (Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo), Prof. Sérgio Armando de Sá e Benevides (Universidade Federal do Ceará), Prof. Álvaro Vieira (Instituto Militar de Engenharia) e Eng. Alfredo Monteiro de Castro Neto (Desenvolvimento Rodoviário S.A.).

A experiência de escrever este livro a oito mãos foi deveras enriquecedora, construindo-o em camadas, com materiais convencionais e alternativos, cuidadosamente analisados, compatibilizando-se sempre as espessuras das camadas e a qualidade dos materiais. No livro, competências e disponibilidades de tempo foram devidamente dosadas entre os quatro autores. Um elemento presente foi o uso de textos anteriormente escritos pelos quatro autores em co-autoria com seus respectivos alunos e colegas de trabalho, sendo estes devidamente referenciados.

Por fim, tal qual uma estrada, por melhor que tenha sido o projeto e a execução, esta obra está sujeita a falhas, e o olhar atento dos pares ajudará a realizar a manutenção no momento apropriado. O avanço do conhecimento na fascinante área de pavimentação segue em alta velocidade e, portanto, alguns trechos da obra talvez mereçam restauração num futuro não distante. Novos trechos devem surgir. Aos autores e aos leitores cabe permanecer viajando nas mais diversas estradas, em busca de paisagens que ampliem o horizonte do conhecimento. Aqui, espera-se ter pavimentado mais uma via para servir de suporte a uma melhor compreensão da engenharia rodoviária. Que esta via estimule novas vias, da mesma forma que uma estrada possibilita a construção de outras tantas.

Os autores

NOTA IMPORTANTE: Os quatro autores participaram na seleção do conteúdo, na organização e na redação de todos os onze capítulos, e consideram suas respectivas contribuições ao livro equilibradas. A ordem relativa à co-autoria levou em consideração tão somente a coordenação da produção do livro.

2.1 INTRODUÇÃO

O asfalto é um dos mais antigos e versáteis materiais de construção utilizados pelo homem. O *Manual de asfalto* (IA, 1989 versão em português, 2001) lista mais de 100 das principais aplicações desse material, desde a agricultura até a indústria. O uso em pavimentação é um dos mais importantes entre todos e um dos mais antigos também. Na maioria dos países do mundo, a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento. No Brasil, cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico, além de ser também utilizado em grande parte das ruas.

Há várias razões para o uso intensivo do asfalto em pavimentação, sendo as principais: proporciona forte união dos agregados, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável; é impermeabilizante, é durável e resistente à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais, podendo ser utilizado aquecido ou emulsionado, em amplas combinações de esqueleto mineral, com ou sem aditivos.

As seguintes definições e conceituações são empregadas com referência ao material:

- *betume*: comumente é definido como uma mistura de hidrocarbonetos solúvel no bissulfeto de carbono;
- *asfalto*: mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo de forma natural ou por destilação, cujo principal componente é o betume, podendo conter ainda outros materiais, como oxigênio, nitrogênio e enxofre, em pequena proporção;
- *alcatrão*: é uma designação genérica de um produto que contém hidrocarbonetos, que se obtém da queima ou destilação destrutiva do carvão, madeira etc.

Portanto, o asfalto e o alcatrão são materiais betuminosos porque contêm betume, mas não podem ser confundidos porque suas propriedades são bastante diferentes. O alcatrão praticamente não é mais usado em pavimentação desde que se determinou o seu poder cancerígeno, além do fato de sua pouca homogeneidade e baixa qualidade em termos de ligante para pavimentação, derivada da própria forma de obtenção do mesmo.

No que diz respeito à terminologia, há uma preferência dos europeus em utilizar o termo betume para designar o ligante obtido do petróleo, enquanto os americanos, inclusive os brasileiros, utilizam mais comumente o termo asfalto para designar o mesmo material. Veja como exemplo, The Asphalt Institute dos Estados Unidos e a Comissão de Asfalto do Instituto Brasileiro do Petróleo e Gás que empregam o termo asfalto, e os conhecidos *The*

Shell Bitumen Handbook e o Congresso Eurobitume, europeus, que dão preferência para a outra designação. Os europeus utilizam às vezes o termo *asphalt* para designar a mistura dos agregados com o asfalto (Shell, 2003), o que se designa atualmente no Brasil genericamente de mistura asfáltica e nos Estados Unidos de *asphalt mixture* ou *asphalt mix*.

Com a total predominância atual do ligante proveniente do petróleo na pavimentação, com o abandono do alcatrão, fica aceitável a utilização dos termos betume e asfalto como sinônimos, sendo que a grande facilidade de divulgação dos conhecimentos entre os países hoje em dia faz com que se tenha acesso a informações tanto européias quanto americanas.

Quando o asfalto se enquadra em uma determinada classificação particular, que em geral se baseia em propriedades físicas que pretendem assegurar o bom desempenho do material na obra, ele passa a ser denominado comumente pela sigla CAP – cimento asfáltico de petróleo, seguida de algum outro identificador numérico, como se verá neste capítulo, no item 2.3.

Há ainda os asfaltos naturais, provenientes de “lagos” formados a partir de depósito de petróleo que migraram para a superfície, e após processos naturais de perda de outras frações, resultaram num produto que contém betume e eventualmente materiais minerais. Foram as primeiras e únicas fontes de asfalto para os vários usos nos últimos 5.000 anos até que, no início do século XX, o domínio das técnicas de exploração de petróleo em profundidade e posterior refino tornaram a utilização dos asfaltos naturais restrita. As primeiras pavimentações asfálticas no Brasil empregaram asfalto natural, importado de Trinidad, em barris, nas ruas do Rio de Janeiro em 1908 (Prego, 1999).

2.2 ASFALTO

2.2.1 Natureza

O asfalto utilizado em pavimentação é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoelástico, impermeável à água e pouco reativo. A baixa reatividade química a muitos agentes não evita que esse material possa sofrer, no entanto, um processo de envelhecimento por oxidação lenta pelo contato com o ar e a água.

No Brasil utiliza-se a denominação CAP para designar esse produto semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas, e que se enquadra em limites de consistência para determinadas temperaturas estabelecidas em especificações que serão mostradas mais adiante.

A característica de termoviscoelasticidade desse material manifesta-se no comportamento mecânico, sendo suscetível à velocidade, ao tempo e à intensidade de carregamento, e à temperatura de serviço. O comportamento termoviscoelástico é mais comumente assumido do que o termoviscoelástico, com suficiente aproximação do real comportamento do material. O CAP é um material quase totalmente solúvel em benzeno, tricloroetileno ou em bissulfeto de carbono, propriedade que será utilizada como um dos requisitos de especificação.

2.2.2 Composição química

Os petróleos ou óleos crus diferem em suas propriedades físicas e químicas, variando de líquidos negros viscosos até líquidos castanhos bastante fluidos, com composição química predominantemente parafínica, naftênica ou aromática. Existem perto de 1.500 tipos de petróleo explorados no mundo, porém somente uma pequena porção deles é considerada apropriada para produzir asfalto (Shell, 2003). Como os óleos crus têm composições distintas dependendo de sua origem, os asfaltos resultantes de cada tipo também terão composições químicas distintas.

Os petróleos distinguem-se pela maior ou menor presença de asfalto em sua composição. Petróleos venezuelanos, como o Boscan e o Bachaquero, são reconhecidos mundialmente como os de melhor qualidade para a produção de asfalto para pavimentação (Pinto, 1991; Leite, 1999; Shell, 2003).

Atualmente no Brasil existem petróleos com qualidade semelhante ao Bachaquero que são utilizados para a produção de asfalto. No Brasil e em outros países são raras as plantas de produção de asfalto a partir de um único petróleo, sendo mais comum unidades de refino que produzem asfalto a partir da mistura de diversos petróleos.

Os CAPs são constituídos de 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligações covalentes. Os cimentos asfálticos de petróleos brasileiros têm baixo teor de enxofre e de metais, e alto teor de nitrogênio, enquanto os procedentes de petróleos árabes e venezuelanos têm alto teor de enxofre (Leite, 1999).

A composição química é bastante complexa sendo que o número de átomos de carbono por molécula varia de 20 a 120. A composição química do CAP tem influência no desempenho físico e mecânico das misturas asfálticas, mas sua maior influência será nos processos de incorporação de agentes modificadores tais como os polímeros, como será visto mais adiante neste capítulo, no item 2.4.

Uma análise elementar dos asfaltos manufaturados pode apresentar as seguintes proporções de componentes (Shell, 2003): carbono de 82 a 88%; hidrogênio de 8 a 11%; enxofre de 0 a 6%; oxigênio de 0 a 1,5% e nitrogênio de 0 a 1%. A composição varia com a fonte do petróleo, com as modificações induzidas nos processos de refino e durante o envelhecimento na usinagem e em serviço. A Tabela 2.1 mostra um exemplo de composição química de alguns ligantes asfálticos.

A composição química também varia com o tipo de fracionamento a que se submete o ligante asfáltico, sendo o método mais moderno atualmente empregado, normalizado pela ASTM D 4124-01, aquele que separa as seguintes frações: saturados, nafteno-aromáticos, polar-aromáticos e asfaltenos. Os asfaltenos são separados primeiro por precipitação com adição de n-heptano, e os outros constituintes, englobados na designação genérica de maltenos, são solúveis no n-heptano e separados por cromatografia de adsorção. Na Europa utiliza-se método similar conhecido como SARA (S de saturados, A de aromáticos, R de resinas e A de asfaltenos), sendo a separação dos constituintes realizada por cromatografia de camada fina com detecção por ionização de chama (Leite, 1999; Shell, 2003).

TABELA 2.1 EXEMPLOS DE COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DE ASFALTOS POR TIPO DE CRU (LEITE, 2003)

Origem	Mexicano	Boscan Venezuela	Califórnia Estados Unidos	Cabiúnas Brasil	Cabiúnas Brasil	Árabe Leve Oriente Médio
Refinaria	–	RLAM Bahia	–	Regap Minas Gerais	Replan São Paulo	Reduc Rio de Janeiro
Carbono %	83,8	82,9	86,8	86,5	85,4	83,9
Hidrogênio %	9,9	10,4	10,9	11,5	10,9	9,8
Nitrogênio %	0,3	0,8	1,1	0,9	0,9	0,5
Enxofre %	5,2	5,4	1,0	0,9	2,1	4,4
Oxigênio %	0,8	0,3	0,2	0,2	0,7	1,4
Vanádio ppm	180	1.380	4	38	210	78
Níquel ppm	22	109	6	32	66	24

A Figura 2.1(a) mostra dois equipamentos usados para essa análise e de maneira esquemática a Figura 2.1(b) relaciona os passos da análise da composição química dos ligantes asfálticos pelo método SARA.

A Figura 2.2 mostra a representação esquemática desses componentes do asfalto (Shell, 2003).

No fracionamento SARA e ASTM D 4124 a separação de asfaltenos por n-heptano é seguida de adsorção dos maltenos em alumina e subsequente desorção com solventes de polaridade crescente, separando-os em saturados, nafteno-aromáticos e polar-aromáticos.

Na cromatografia de camada fina (TLC – método latroscan), a precipitação dos asfaltenos com n-heptano é seguida por separação dos constituintes solúveis em colunas capilares recheadas com sílica ou alumina, como meio de adsorção. Após a eluição com solventes de diferentes polaridades, efetua-se, por ionização de chama, a detecção de saturados, aromáticos e resinas. O método latroscan também separa por polaridade os asfaltenos, além dos saturados, aromáticos e resinas, em colunas capilares, procedendo em seguida à eluição e à detecção por chama.

Para determinar o teor de heteroátomos empregam-se (Leite, 1999):

- *nitrogênio, enxofre e oxigênio*: análise elementar que envolve combustão, purificação dos gases e detecção por titulação, quimiluminescência ou infravermelho;
- *níquel, vanádio e ferro*: absorção atômica ou fluorescência de raio X;
- *nitrogênio básico*: titulação potenciométrica.

A massa molar é obtida por osmometria de pressão de vapor (VPO) utilizando o tolueno como solvente. O carbono aromático é obtido a partir do espectro integrável de experimentos em ressonância nuclear magnética (RNM) – carbono 13.

A cromatografia por permeação em gel (GPC) é utilizada para separação dos constituintes dos CAPs diluídos em solvente, por tamanho – pequenas moléculas movem-se

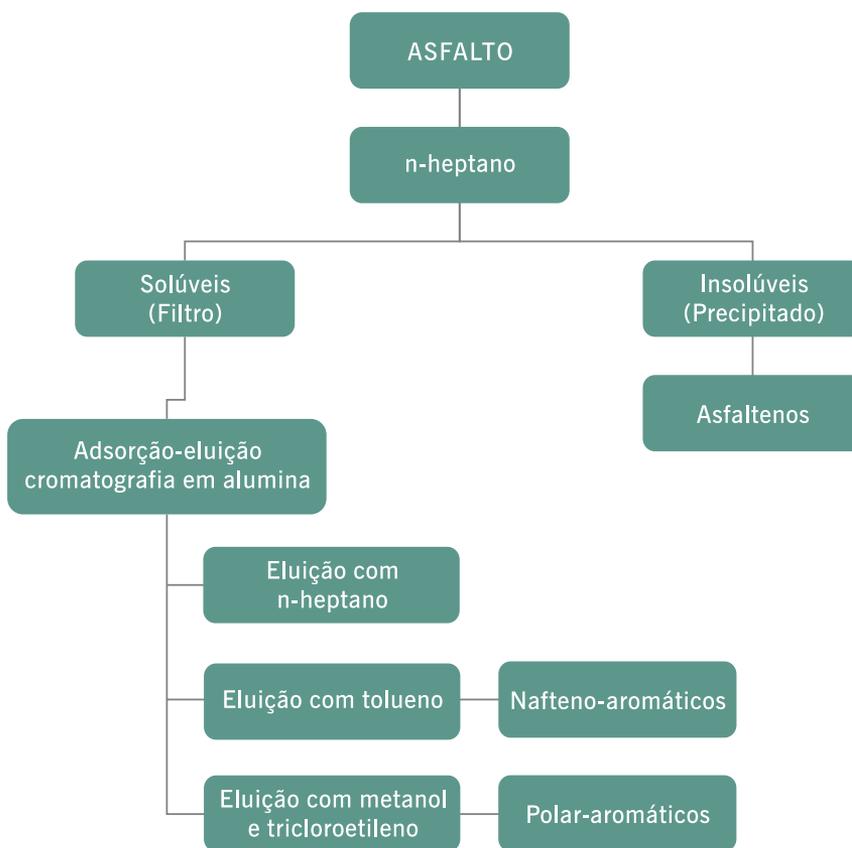


Cromatografia



Detector de ionização de chama

(a) Vista dos equipamentos usados para análise de CAP



(b) Esquema

Figura 2.1 Equipamentos utilizados no método SARA e esquema da análise química do ligante asfáltico (adaptado de Shell, 2003)

lentamente, entrando no meio poroso da coluna, ao passo que estruturas maiores não conseguem penetrar, passando rapidamente pela coluna. O cromatograma resultante é o de distribuição de tamanho dos constituintes, começando pelos maiores e finalizando pelos menores. Efetua-se a comparação dos CAPs pelos perfis obtidos na análise (Leite, 1999).

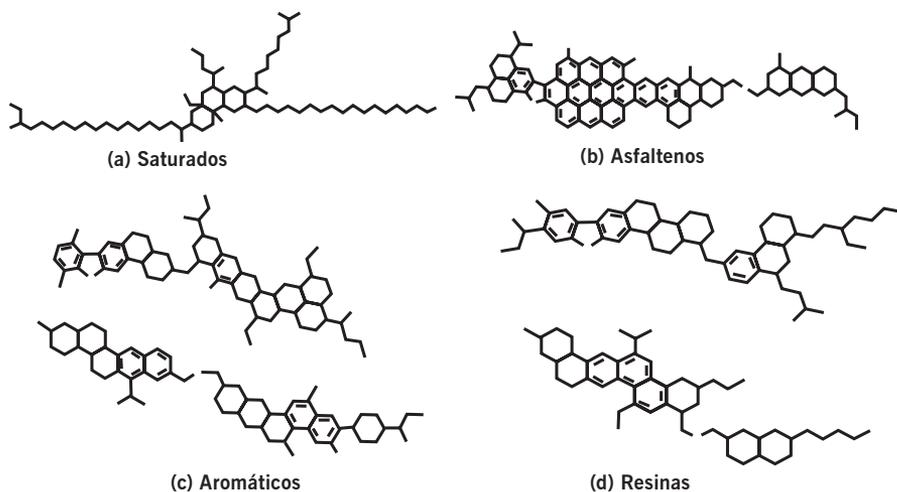


Figura 2.2 Representação esquemática dos componentes dos asfaltos (apud Shell, 2003)

Os asfaltenos são aglomerados de compostos polares e polarizáveis formados por associações intermoleculares, constituídos de hidrocarbonetos naftênicos condensados e de cadeias saturadas curtas, sendo sólidos amorfos pretos ou marrons. A quantidade de asfaltenos tem grande efeito nas características reológicas do CAP: quanto maior o percentual de asfaltenos, mais duro e mais viscoso será o ligante asfáltico, embora se deva considerar ainda a forma do asfaleno, sendo maior o efeito sobre a reologia quanto mais esférica for a partícula. Em geral os asfaltenos constituem de 5 a 25% do CAP (Shell, 2003).

As resinas são solúveis em n-heptano. São compostos de hidrogênio e carbono, com pequena proporção de oxigênio, enxofre e nitrogênio. São sólidos ou semi-sólidos marrom-escuros, sendo de natureza polar e fortemente adesiva. As proporções de resinas e asfaltenos governam o comportamento como solução (Sol) ou como gelatina (Gel) do CAP.

Os componentes aromáticos são de baixa massa molar e em maior proporção no asfalto, sendo o meio de dispersão e peptização dos asfaltenos. Esses componentes formam um líquido viscoso amarelo polar, com cadeias não-saturadas de carbono, constituindo de 40 a 65% do total do asfalto. Os saturados são cadeias retas e ramificadas de hidrocarbonetos, sendo óleos viscosos não-polares transparentes, compondo de 5 a 20% dos asfaltos.

O CAP é tradicionalmente considerado uma dispersão coloidal (Girdler, 1965) de asfaltenos em saturados e aromáticos, conhecidos genericamente por maltenos, imersos em resinas, que são como micelas diretas ou reversas, ou seja, grupos polares orientados para fora ou para o centro. O modelo de Yen ou modelo de micelas (Yen, 1991) está representado na Figura 2.3. Uma micela é um aglomerado de moléculas em uma solução coloidal. Um colóide é uma mistura que consiste de grandes moléculas simples, dispersas em uma segunda substância (Leite, 1999; Hunter, 2000).

Em presença de quantidade suficiente de resinas e aromáticos, os asfaltenos formam micelas com boa mobilidade e resultam em ligantes conhecidos como Sol. Porém, se as frações não estão bem balanceadas, há formação de estruturas de pacotes de micelas com

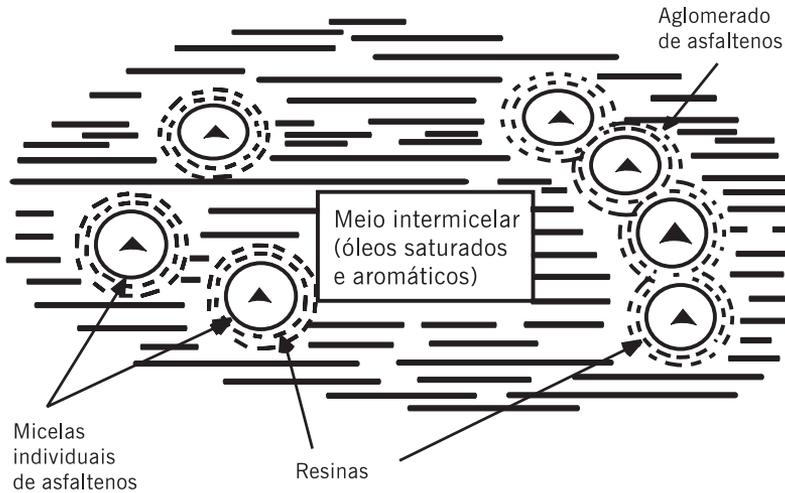
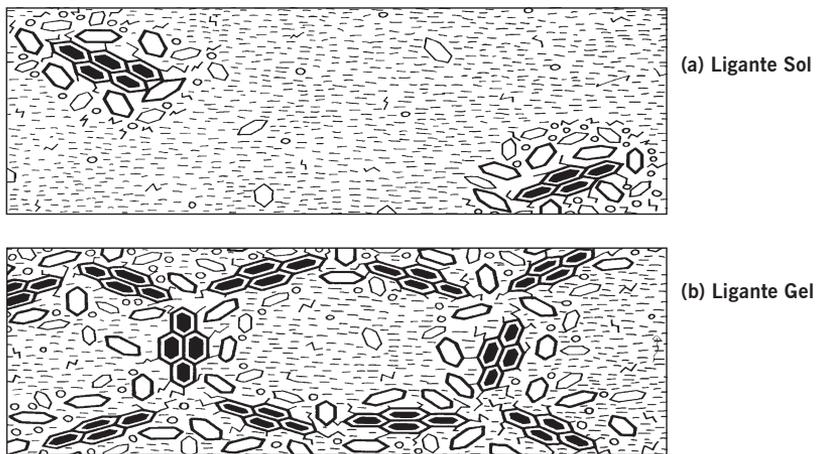


Figura 2.3 Modelo de micelas de Yen (1991)

vazios internos que resultam em ligantes de comportamento conhecido como Gel, sendo um exemplo desse tipo os asfaltos oxidados utilizados em impermeabilizações. Esse comportamento Gel pode ser minimizado com o aumento de temperatura (Leite, 1999; Shell, 2003). A Figura 2.4 mostra a representação esquemática dos comportamentos Sol e Gel.

Ramos *et al.* (1995) dizem que os asfaltos tipo Sol apresentam maior suscetibilidade térmica por terem óleos intermicelares muito aromáticos, o que os torna mais moles, menos resistentes à aplicação direta das cargas, porém mais suscetíveis a um pleno retorno à posição original após a aplicação da carga. Já os asfaltos tipo Gel são mais resistentes à



- | | | | |
|---|---------------------------------------|---|---|
|  | Asfaltenos |  | Hidrocarbonetos saturados |
|  | Hidrocarbonetos aromáticos/naftênicos |  | Hidrocarbonetos aromáticos de alta massa molar |
|  | Hidrocarbonetos alifáticos |  | Hidrocarbonetos aromáticos de baixa massa molar |

Figura 2.4 Representação esquemática do ligante asfáltico de comportamento Sol e Gel (Shell, 2003)

aplicação das cargas e menos suscetíveis ao retorno, conseqüentemente são mais propensos ao trincamento prematuro. Entretanto, essas e todas as demais propriedades do CAP variam muito com a temperatura, por isso a característica de suscetibilidade térmica de cada ligante é de extrema importância para o comportamento futuro do pavimento.

A proporção de cada fração desses quatro componentes dos ligantes varia de acordo com o óleo de origem e com o processo de produção, e depois de aplicado nas obras há variação ao longo do tempo, sendo que em geral o conteúdo de asfaltenos proporcionalmente aumenta, o de resinas mais ou menos se mantém e o de aromáticos decresce, mantendo-se pouco variável o teor de saturados.

Embora a composição química possa ser relacionada com as propriedades físicas dos vários componentes do CAP, nota-se que asfaltos de composições químicas diferentes podem apresentar características físicas similares, desde que derivados de óleos diferentes. Portanto, é impossível definir componentes individuais mínimos em termos químicos como garantia de comportamento adequado de um ligante do ponto de vista de desempenho na pavimentação (Shell, 2003).

Muitos pesquisadores têm tentado mostrar a existência de micelas de asfaltenos usando técnicas de cromatografia por exclusão de tamanho, microscópio eletrônico e ressonância nuclear magnética, e em muitos casos o modelo de representação da estrutura do asfalto como micela não se mostra coerente com os resultados obtidos.

Novas proposições de modelo estrutural do asfalto têm surgido, tal como o proposto pelo SHRP (Strategic Highway Research Program) ilustrado na Figura 2.5. Foram evidenciados, por meio de técnicas de análise de espectroscopia infravermelha e cromatografia de troca de íons (IEC), numerosos tipos possíveis de interação entre moléculas dos ligantes, incluindo pontes de hidrogênio, ligações π - π , forças de Van der Waals e atrações polares. O programa SHRP identificou a presença de substâncias anfóteras nos asfaltos, ou seja, que contêm grupamentos ácidos e básicos juntos, que vão controlar a viscosidade do ligante. O modelo estrutural do programa SHRP não considera válido o conceito de asfaltenos e classifica os compostos constituintes em polares e não-polares.

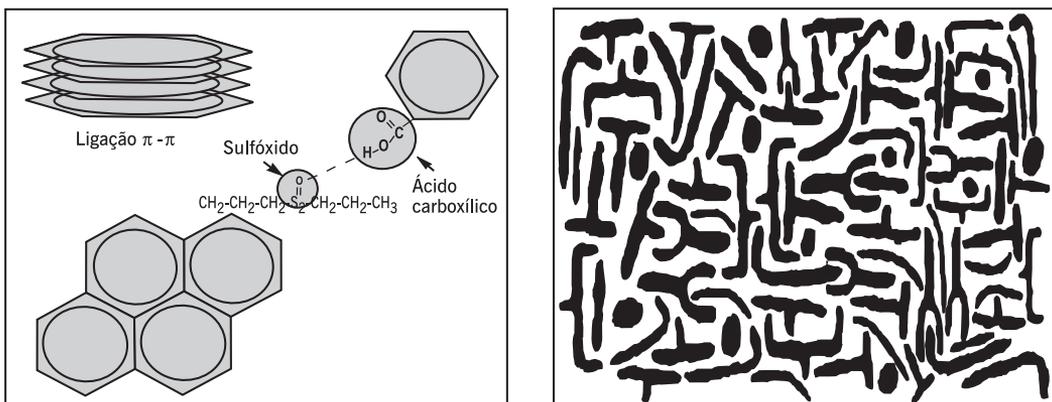


Figura 2.5 Modelo de estrutura do asfalto proposto pelo SHRP (apud Leite, 2003)

SHRP (1991) mostra que novas técnicas de medição indicam que a massa molar média do CAP varia entre 700 e 900, muito menor do que se admitia anteriormente, o que indica uma estrutura formada por associações moleculares fracamente ligadas, denominadas microestruturas. Esse modelo estrutural classifica os compostos constituintes do CAP em polares e não-polares, ligados por forças intra e intermoleculares que são responsáveis pela formação de redes tridimensionais que explicam as características viscoelásticas do ligante asfáltico.

Uma outra forma de descrever a estrutura do asfalto é pelo método da solubilidade, que envolve a determinação da atração ou da repulsão das partículas individuais utilizando uma série de titulações.

2.2.3 Processos de produção, estocagem e manuseio

Quase todo o asfalto em uso hoje em dia é obtido do processamento de petróleo bruto (ou cru) em plantas especiais denominadas refinarias. Muitas refinarias são localizadas próximas a locais com transporte por água, ou são supridas por dutos a partir de terminais marítimos.

A escolha do petróleo que pode resultar em um asfalto dentro da especificação para uso em pavimentação é feita através de avaliação de resíduos de vácuo de petróleos. Nessa avaliação pelo menos cinco resíduos de vácuo correspondentes a diferentes temperaturas de corte são obtidos em unidades PEV (ponto de ebulição verdadeiro) no laboratório do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Américo Leopoldo Miguez de Mello (Cenpes) para cada tipo de petróleo. Os resíduos são caracterizados quimicamente e quanto aos requisitos das especificações brasileiras, européias e americanas Superpave do CAP. Em função dos resultados obtidos, podem-se estimar as características de resíduos intermediários, mais leves ou pesados, podem-se ainda construir curvas de propriedades *versus* temperaturas de corte, gráficos de penetração *versus* ponto de amolecimento e penetração *versus* viscosidade a 60°C, bem como gráficos de Heukelom dos diferentes resíduos através do *software* BR-asfaltos. A comparação dos resultados com as especificações e os critérios internos Petrobras indica se o petróleo é adequado ou não para produção de cimentos asfálticos de petróleo e ainda a seleção das temperaturas de corte apropriadas à obtenção dos diversos tipos de CAP.

O teor de parafinas é um dos critérios empregados na seleção de petróleos adequados que é determinado por meio de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) feita, por exemplo, com o uso do equipamento Sistema Mettler DSC-30/TA 4000. A calorimetria com o DSC é uma técnica rápida e precisa, com boa repetibilidade, que consome pequena quantidade de amostra.

O refino é o conjunto de processos de separação e/ou transformação dos constituintes do petróleo. Existem diferentes processos de refino de petróleo que produzem os ligantes asfálticos. O mais antigo é o da destilação direta, que pode ser realizada em um ou dois estágios. Quando o petróleo é de base asfáltica, designado por petróleo pesado (isto é, tem muito asfalto, proporcionalmente a outras frações ou petróleos), como por exemplo os

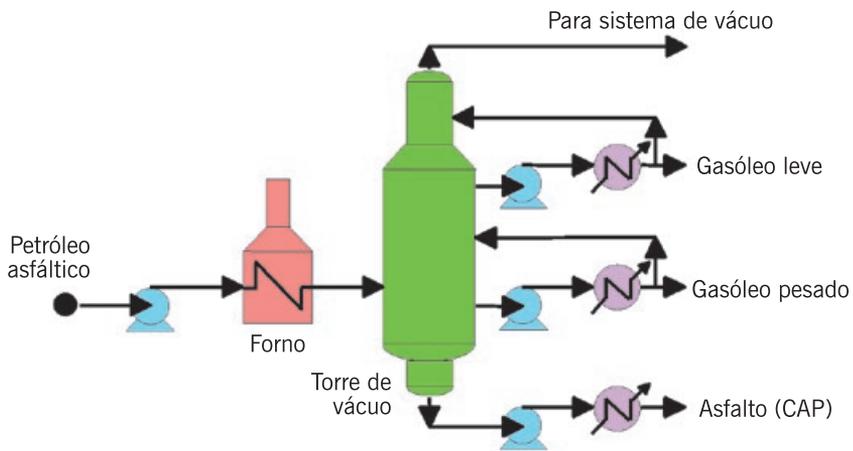
venezuelanos Boscan, Bachaquero, Lagunillas e Tia Juana, e o brasileiro Fazenda Alegre, é necessário apenas um estágio de destilação a vácuo e este processo produz um CAP de consistência adequada para a pavimentação.

Se o petróleo não é de base asfáltica, como por exemplo os leves: Árabe Leve, Safaniya, Kirkuk e Kuwait, são necessários dois estágios de destilação: atmosférica e a vácuo. Petróleos ditos intermediários são processados em dois estágios, resultando no chamado resíduo de vácuo, cujas condições de pressão e temperatura definem o atendimento às especificações para uso em pavimentação. Pode ser ainda empregada a desasfaltação por solvente quando o petróleo processado é leve ou intermediário, que consiste em um processo de extração com alcanos de baixa massa molar (ex. propano/butano) dos resíduos de vácuo (Leite, 1999; Shell, 2003).

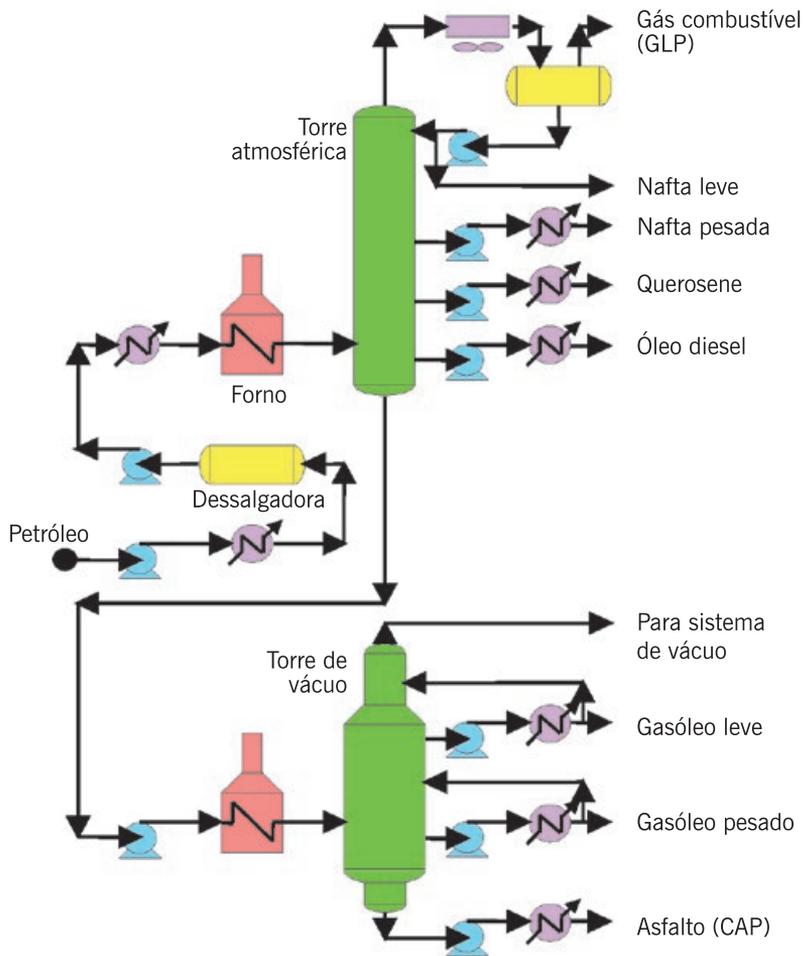
As Figuras 2.6(a, b, c, d, e, f), elaboradas originalmente por Tonial e Bastos (1995) da Petrobras, mostram os possíveis processos utilizados para a produção de asfaltos, pelos métodos citados acima. As refinarias têm colunas ou torres de destilação que são divididas em intervalos por faixa de temperatura de obtenção dos vários cortes do petróleo (nafta, querosene, gasóleos) antes de se obter o asfalto. Daí, muitas vezes o asfalto ser denominado “resíduo” do petróleo, embora esse termo não se associe de forma alguma a um material sem características adequadas ao uso, mas sim ao processo de refino.

Quando acondicionados de maneira apropriada, o que acontece de uma forma geral nos tanques das refinarias, os asfaltos podem ser mantidos a elevadas temperaturas por um tempo considerável sem que sejam afetados adversamente (Tonial, 2001; Shell, 2003). Porém, um aquecimento a temperaturas elevadas (maiores do que 150°C), mesmo por tempos relativamente curtos (menores que um minuto, como ocorre na usinagem) pode causar um envelhecimento elevado do ligante desde que haja presença de ar e uma espessura muito fina de asfalto. Portanto, quanto maior a temperatura, o tempo de aquecimento e menor a espessura de película asfáltica, maior será o envelhecimento do ligante. A espessura do ligante ao envolver os agregados pode ser muito fina se a relação entre o volume de ligante e a superfície específica dos agregados não for bem proporcionada.

De forma a evitar um possível endurecimento e envelhecimento do ligante durante a estocagem, os tanques devem ser munidos de sensores de temperatura, posicionados na região dos aquecedores e serem removíveis para manutenção freqüente. A oxidação e a perda de frações voláteis podem ocorrer pela superfície exposta sendo proporcional a essa área e à temperatura do tanque, e, portanto, os tanques verticalmente mais altos são preferíveis aos mais baixos, ou seja, a relação altura/raio do tanque circular deve ser tecnicamente a maior possível, considerando a relação área/volume de estocagem (Shell, 2003). A recirculação de material, quando o tempo de estocagem é elevado, deve também ser feita considerando esses fatores, ou seja, a entrada no tanque não pode ser fonte de ar para o sistema, e deve ser utilizada somente de forma intermitente.

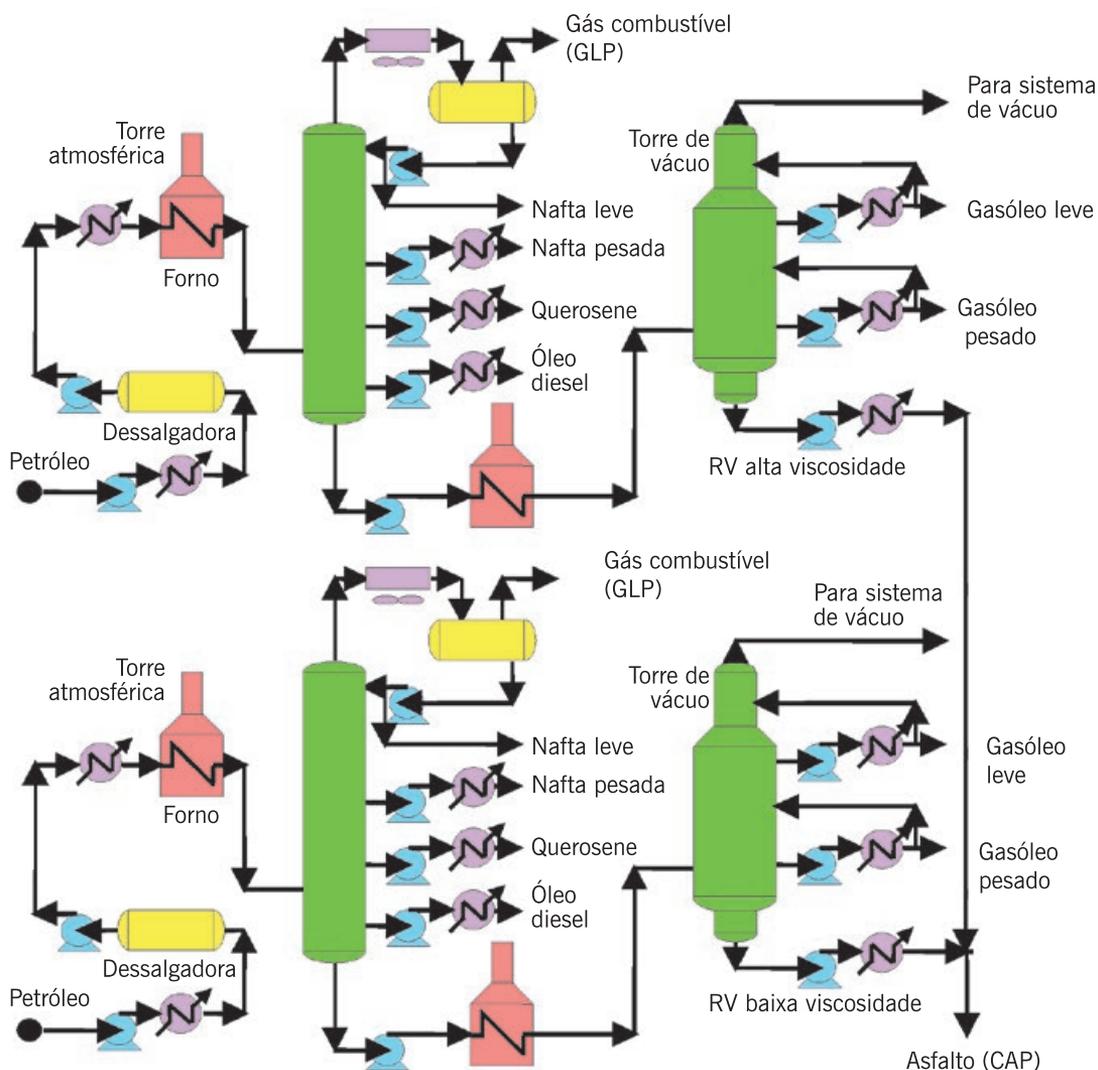


(a) Esquema de produção de asfalto em um estágio



(b) Esquema de produção de asfalto por dois estágios de destilação

Figura 2.6 Esquemas de refino do petróleo para obtenção do asfalto (Tonial e Bastos, 1995)

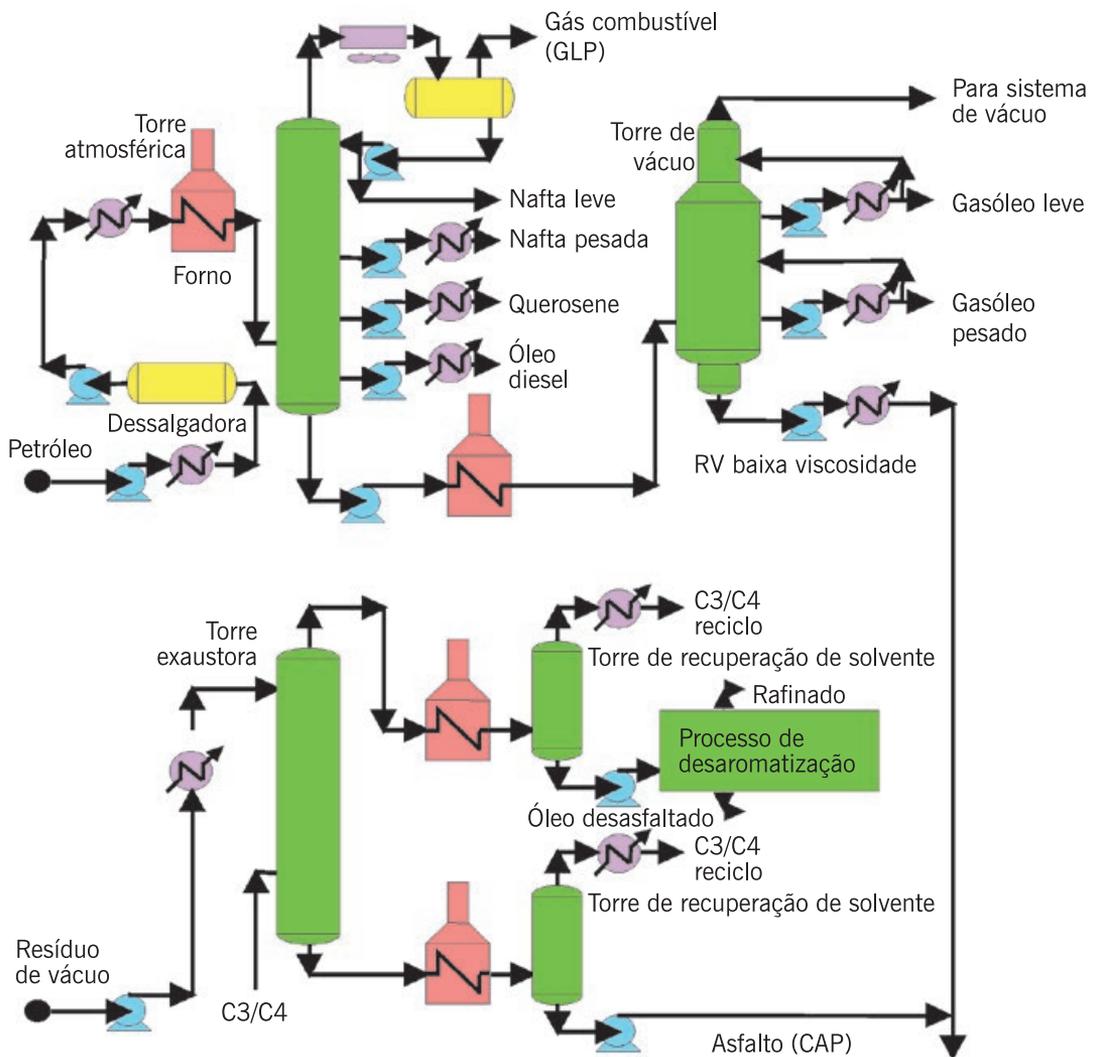


(c) Esquema de produção de asfalto por mistura de resíduo de vácuo (RV) de alta e baixa viscosidades

Figura 2.6 Esquemas de refino do petróleo para obtenção do asfalto (Tonial e Bastos, 1995)

Os tanques de estocagem de CAP nas usinas de fabricação de misturas devem ter controle automático do nível de estocagem e, antes de se colocar ligante adicional no tanque, é necessário conferir os limites permitidos de altura de estocagem, bem como se certificar de que o tipo adicionado seja do mesmo preexistente.

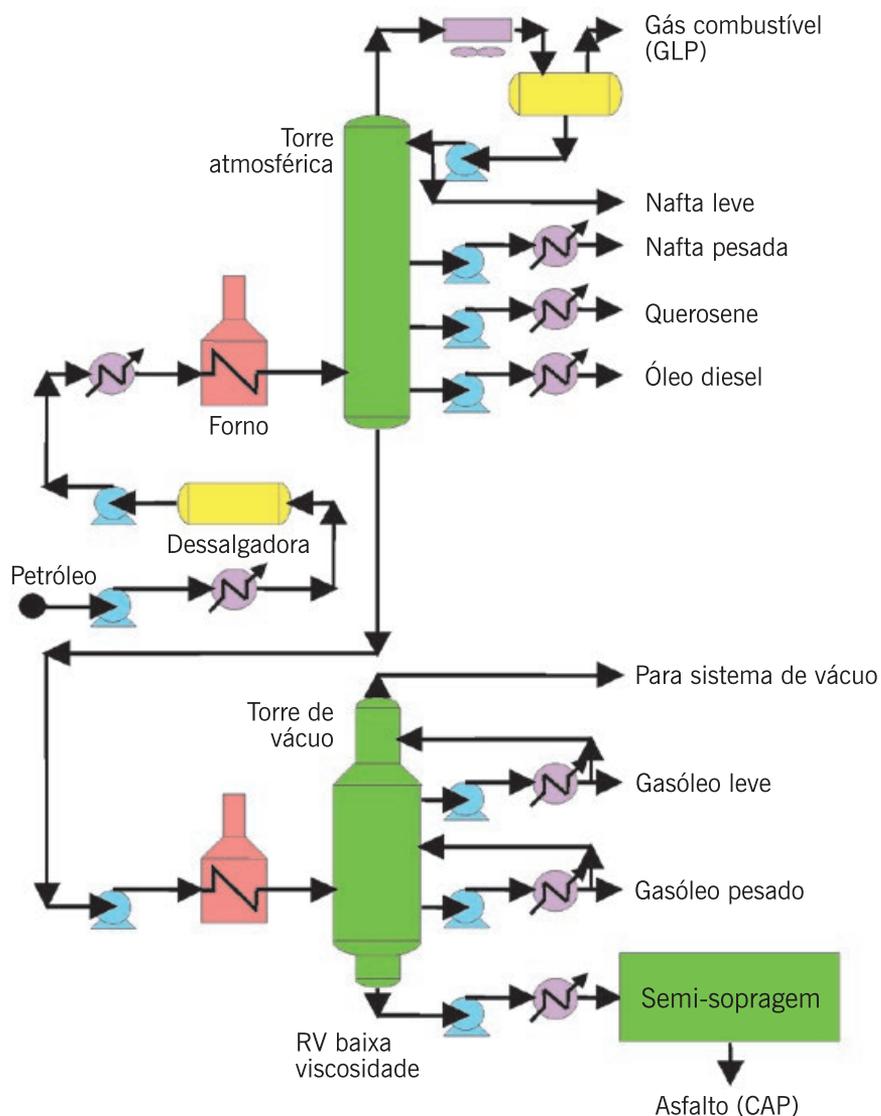
O CAP deve ser sempre estocado e manuseado à temperatura mais baixa possível em relação à fluidez suficiente ao uso, considerando a viscosidade adequada para a operacionalidade das ações necessárias aos processos de mistura em linha ou transferência para os sistemas de transportes (Hunter, 2000; Shell, 2003).



(d) Esquema de produção de asfalto por mistura de RASF e diluente

Figura 2.6 Esquemas de refino do petróleo para obtenção do asfalto (Tonial e Bastos, 1995)

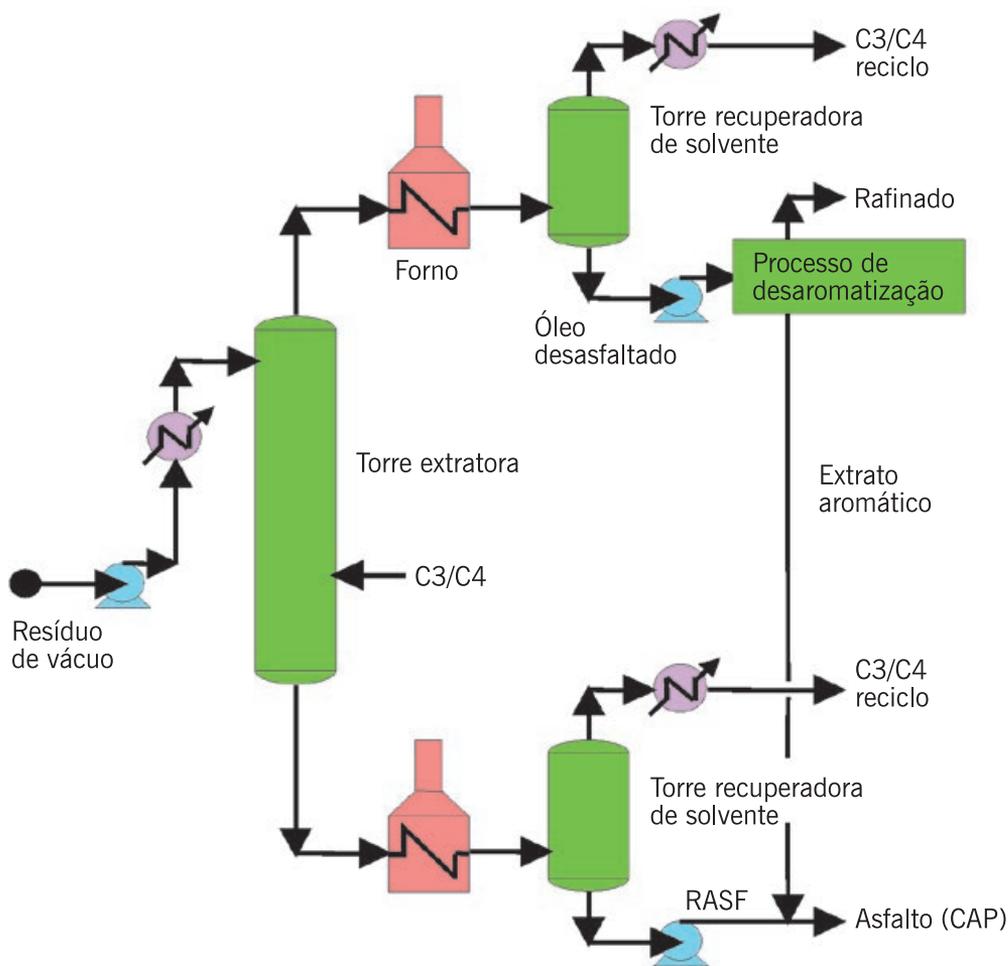
O ligante asfáltico apresenta pequeno grau de risco para a saúde, devendo-se cumprir práticas adequadas de uso. Como é utilizado sempre em temperaturas altas durante o transporte, estocagem e processamento, é necessário o emprego de equipamentos especiais de proteção individual para manuseio. As emissões de vapores visíveis e fumaças começam a ser percebidas a temperaturas em torno de 150°C e são compostas de hidrocarbonetos e pequena quantidade de H₂S. Essa quantidade de H₂S pode acumular-se em ambientes fechados, tais como o tanque de estocagem, e pode ser letal caso não haja ventilação adequada. Também pode conter pequena quantidade de compostos aromáticos policíclicos. O ligante asfáltico tem baixa possibilidade de se incendiar e só



(e) Esquema de produção de asfalto por semi-sopragem

Figura 2.6 Esquemas de refino do petróleo para obtenção do asfalto (Tonial e Bastos, 1995)

em temperaturas muito altas, em torno de 400°C, apresentaria autocombustão. Porém, apesar de baixo risco, cuidados especiais devem ser tomados nos tanques de estocagem e no processamento. Também é necessário evitar que o CAP aquecido tenha contato com água, pois haverá grande aumento de volume resultando em espumação e até, dependendo da quantidade de água, poderá haver fervura do ligante. Essa característica tem sido explorada em condições padronizadas recentemente na fabricação do chamado asfalto-espuma, que será visto mais adiante neste capítulo.



(f) Unidade de desasfaltação a propano

Figura 2.6 Esquemas de refino do petróleo para obtenção do asfalto (Tonial e Bastos, 1995)

2.2.4 Produção brasileira

A Figura 2.7 mostra a localização das refinarias que produzem asfalto, atualmente existentes no Brasil. A Petrobras possui nove conjuntos produtores e distribuidores de asfalto de petróleo no Brasil: Amazonas, Ceará, Bahia, Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo (dois), Paraná e Rio Grande do Sul, além de uma unidade de exploração de xisto, localizada no Paraná, que produz insumos para pavimentação. Possui ainda fábricas de emulsões asfálticas pertencentes à Petrobras Distribuidora e laboratórios de análise em todas as suas 11 refinarias. Conta também com o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (Cenpes) para desenvolvimento de produtos, acompanhamento da qualidade dos asfaltos comercializados e pesquisas conjuntas com universidades e outras instituições de pesquisa.



Figura 2.7 Localização e denominação das refinarias de petróleo brasileiras que produzem asfalto

(Fonte: Petrobras)

No final da década de 1990, segundo Leite (1999), a Petrobras produzia cerca de 2 milhões de toneladas anuais de cimento asfáltico de petróleo, sendo 60% a partir de petróleos nacionais, 20% de petróleos venezuelanos e os 20% restantes de petróleos argentinos e árabes, sendo que a meta prevista para a primeira década do século XXI era o emprego de petróleos brasileiros para toda a produção de cimentos asfálticos, o que vem se confirmando.

Os tipos de ligantes asfálticos existentes no mercado brasileiro são denominados:

- a) cimentos asfálticos de petróleo – CAP;
- b) asfaltos diluídos – ADP;
- c) emulsões asfálticas – EAP;

- d) asfaltos oxidados ou soprados de uso industrial;
- e) asfaltos modificados por polímero – AMP ou por borracha de pneus – AMB;
- f) agentes rejuvenescedores – AR e ARE.

Atualmente, há ainda a técnica de asfalto-espuma sendo empregada no Brasil, mas que rigorosamente não constitui uma outra classe de material pelo tipo de modificação de curta duração que sofre o CAP convencional nesta condição como será visto mais adiante neste capítulo.

Como o CAP é a base de praticamente todos os outros produtos, apresenta-se na Figura 2.8 o consumo brasileiro de asfalto de 2000 a 2009. Em 2008, registrou-se o maior consumo com mais de 2.125 mil toneladas, excedendo a marca de 1.970 mil toneladas de 1998.

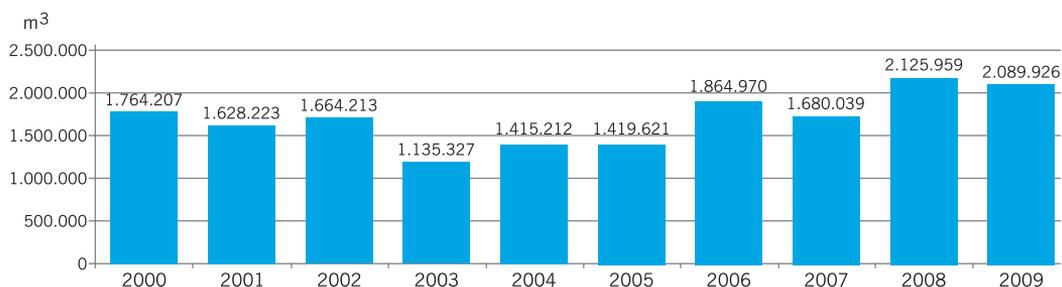


Figura 2.8 Consumo brasileiro de asfalto entre 2000 e 2009

(Fonte: Petrobras)

2.2.5 Propriedades físicas do asfalto: ensaios correntes e cálculo da suscetibilidade térmica

Todas as propriedades físicas do asfalto estão associadas à sua temperatura. O modelo estrutural do ligante como uma dispersão de moléculas polares em meio não-polar ajuda a entender o efeito da temperatura nos ligantes asfálticos.

Em temperaturas muito baixas, as moléculas não têm condições de se mover umas em relação às outras e a viscosidade fica muito elevada; nessa situação o ligante se comporta quase como um sólido. À medida que a temperatura aumenta, algumas moléculas começam a se mover podendo mesmo haver um fluxo entre as moléculas. O aumento do movimento faz baixar a viscosidade e, em temperaturas altas, o ligante se comporta como um líquido. Essa transição é reversível.

Um dos critérios mais utilizados de classificação dos ligantes é a avaliação da sua suscetibilidade térmica, por algum ensaio que meça direta ou indiretamente sua consistência ou viscosidade em diferentes temperaturas. A faixa de temperatura correspondente à transição entre sólido e líquido é influenciada pela proporção dos quatro componentes do ligante asfáltico e pela interação entre eles.

Portanto, todos os ensaios realizados para medir as propriedades físicas dos ligantes asfálticos têm temperatura especificada e alguns também definem o tempo e a velocidade de carregamento, visto que o asfalto é um material termoviscoelástico.

Para se especificar um determinado asfalto como adequado para pavimentação, a maioria dos países utiliza medidas simples de características físicas do ligante, pela facilidade de execução nos laboratórios de obras. As duas principais características utilizadas são: a “dureza”, medida através da penetração de uma agulha padrão na amostra de ligante, e a resistência ao fluxo, medida através de ensaios de viscosidade.

Acrescentaram-se ao longo dos anos nas especificações alguns outros critérios de aceitação que são associados a ensaios empíricos, que, a princípio, tentam avaliar indiretamente o desempenho futuro do ligante nas obras de pavimentação.

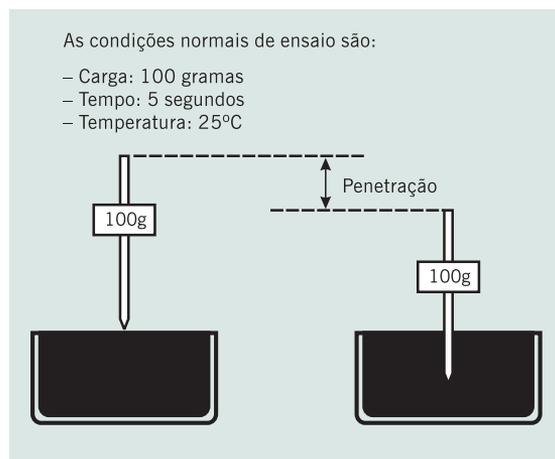
Os ensaios físicos dos cimentos asfálticos podem ser categorizados entre ensaios de consistência, de durabilidade, de pureza e de segurança.

Ensaio de penetração

A penetração é a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra numa amostra de volume padronizado de cimento asfáltico, por 5 segundos, à temperatura de 25°C. Em cada ensaio, três medidas individuais de penetração são realizadas. A média dos três valores é anotada e aceita, se a diferença entre as três medidas não exceder um limite especificado em norma. A consistência do CAP é tanto maior quanto menor for a penetração da agulha. A norma brasileira para este ensaio é a ABNT NBR 6576/98. A Figura 2.9 mostra o equipamento utilizado para realização desse ensaio e uma representação esquemática das leituras inicial e final de penetração da agulha.



(a) Equipamento manual



(b) Esquema básico do ensaio

Figura 2.9 Exemplo de equipamento manual de medida da penetração e esquema do ensaio

A penetração a 25°C tem sido utilizada na especificação de cimentos asfálticos em todos os países do mundo por várias décadas. A especificação de ligantes da Comunidade Econômica Européia (EM 12591/2000), que resultou de um acordo entre os vários países participantes, define nove classes de asfalto pela penetração, desde a classe 20/30 até 250/330. A penetração também é empregada na atualidade no Brasil para a classificação dos CAPs que será vista no item 2.3 deste capítulo.

Ensaio de viscosidade

A viscosidade é uma medida da consistência do cimento asfáltico, por resistência ao escoamento. Considere-se um líquido viscoso perfeitamente aderente a duas placas paralelas de vidro, com uma distância D entre as placas, conforme esboçado na Figura 2.10. Aplicando-se uma tensão tangencial τ na placa superior (móvel) durante um intervalo de tempo Δt , ela adquire uma velocidade V em relação à placa inferior (fixa). O líquido se deforma com uma velocidade de deformação $\Delta\gamma/\Delta t$, onde $\Delta\gamma$ é o deslocamento ΔX sofrido em relação à distância D . Para os chamados fluidos newtonianos vale a seguinte relação:

$$\tau = \eta \frac{V}{D} = \eta \frac{\Delta X}{\Delta t D} = \eta \frac{\Delta\gamma}{\Delta t} \quad (2.1)$$

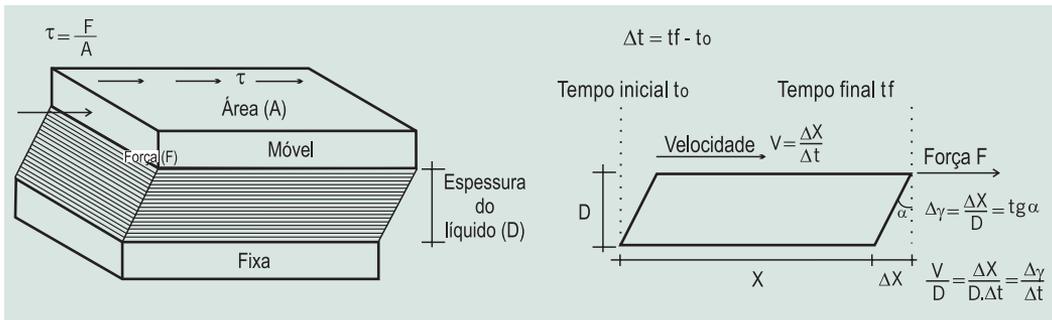


Figura 2.10 Esquema de escoamento de um fluido newtoniano

A relação entre a tensão de cisalhamento aplicada (τ) e a velocidade de deformação ($\Delta\gamma/\Delta t$) é chamada de coeficiente de viscosidade ou apenas viscosidade (η), expressa em $[N/m^2] / [1/s] = Pa.s$, sendo função somente da temperatura e dada por:

$$\eta = \tau / [\Delta\gamma/\Delta t] \quad (2.2)$$

A unidade do coeficiente de viscosidade mais utilizada é o poise ($g/[cm.s]$), nome dado em homenagem ao físico francês Poiseuille. O aparelho que faz a avaliação dessa propriedade, não de forma esquemática, chama-se viscosímetro de placas paralelas, no qual se pode variar τ e, conseqüentemente, $\Delta\gamma/\Delta t$.

A viscosidade também pode ser medida em m^2/s , ou mais comumente em mm^2/s , unidade referida como centistoke (cSt). Trata-se, nesse caso, da viscosidade cinemática (η_c) obtida a partir de tubos capilares. A viscosidade cinemática é relacionada com a viscosidade absoluta (η_a) através da massa específica do material (ρ) pela expressão (2.3):

$$\eta_c = \frac{\eta_a}{\rho} = \frac{\left(\frac{kg}{s^2}\right)\left(\frac{1}{m^2}\right)s}{\frac{kg}{m^3}} \quad (2.3)$$

Um viscosímetro que não apresente a facilidade para variar $\Delta\gamma/\Delta t$ e τ é chamado viscosímetro secundário. Um exemplo clássico é o viscosímetro capilar de Cannon-Manning – Figura 2.11(a). Nesse viscosímetro capilar, para a determinação da viscosidade, é medido o tempo que um volume fixo do material leva para escoar em um tubo capilar, de baixo para cima, sob condição preestabelecida e controlada de temperatura e de vácuo. A viscosidade, em poise, é calculada multiplicando-se o tempo de escoamento, em segundos, pelo fator de calibração do viscosímetro (ABNT NBR 5847/2001).

Os fabricantes calibram seus viscosímetros com um material padrão. Quando se ensaia um cimento asfáltico de viscosidade desconhecida, a tensão de cisalhamento é a mesma da utilizada quando se calibrou o viscosímetro com o material padrão (apenas tensão gravitacional atuando). A única diferença será a velocidade de deformação (taxa de cisalhamento), que é inversamente proporcional ao tempo requerido para passar o líquido pelo tubo ($\eta \propto t$). A relação dada pela expressão (2.4) é usada para determinar a viscosidade cinemática:

$$\frac{\eta_2}{t_2} = \frac{\eta_1}{t_1} \quad \text{ou} \quad \eta_2 = t_2 \left(\frac{\eta_1}{t_1} \right) \quad (2.4)$$

Onde:

η_1 = viscosidade do material padrão;

η_2 = viscosidade do material ensaiado;

t_1 = tempo para o material padrão passar pelo tubo (tempo de escoamento);

t_2 = tempo para o material ensaiado passar pelo mesmo tubo capilar (tempo de escoamento);

η_1/t_1 = fator de calibração (constante).

Em equipamento semelhante, e com o mesmo princípio, na ausência de vácuo, mede-se também a viscosidade cinemática, com os chamados viscosímetros Cannon-Fenske – Figura 2.11(b), à temperatura de $135^\circ C$, suficientemente elevada de forma a tornar desnecessária a aplicação de vácuo para iniciar o deslocamento do ligante asfáltico (ABNT NBR 14756/2001).

Algumas especificações no mundo, e também a penúltima no Brasil, que foi válida até julho de 2005, adotam ou adotavam a viscosidade absoluta a $60^\circ C$, com 300mm

de mercúrio de vácuo (Cannon-Manning) e a viscosidade cinemática a 135°C (Cannon-Fenske) para classificar os asfaltos em termos de consistência considerando as seguintes observações (DNER 1996):

- A temperatura de 60°C para determinação da viscosidade absoluta foi escolhida por acreditar-se que expressa a máxima temperatura da superfície em concreto asfáltico de pavimentos durante o período do verão nos Estados Unidos – Figura 2.11(a);
- A temperatura de 135°C para determinação da viscosidade cinemática foi escolhida como representativa da temperatura de mistura e de execução usadas na construção de pavimentos de mistura asfáltica. A essa temperatura o asfalto é suficientemente líquido para fluir e não há necessidade de se aplicar vácuo – Figura 2.11(b).



Equipamento



Unidade de vácuo



Viscosímetro

(a) Equipamento de ensaio de viscosidade capilar Cannon-Manning, bomba de vácuo correspondente e exemplo de viscosímetro utilizado no ensaio



(b) Equipamento de viscosidade cinemática Cannon-Fenske

Figura 2.11 Equipamentos para ensaios de viscosidade absoluta e cinemática

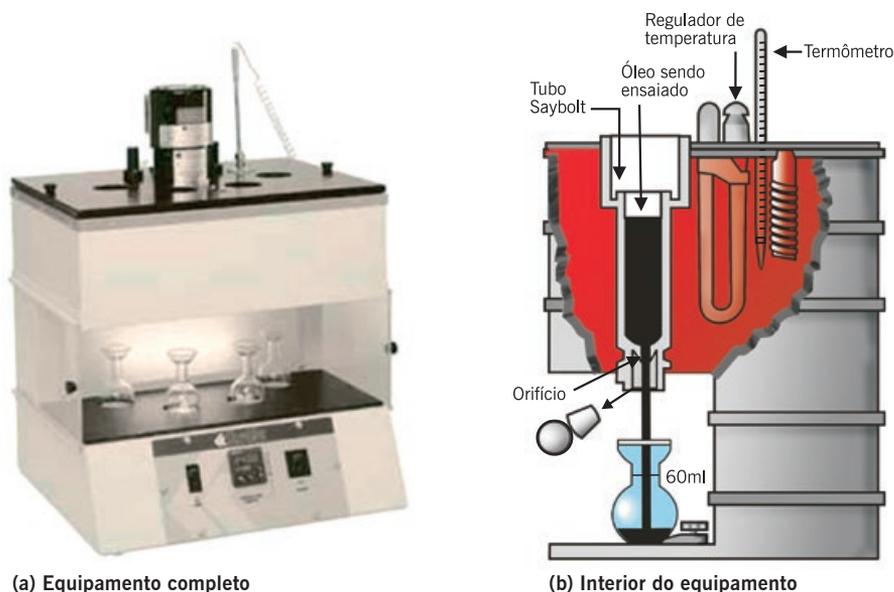


Figura 2.12 Exemplo de equipamento Saybolt-Furol de ensaio de viscosidade e esquema do interior do equipamento

No Brasil o viscosímetro mais usado para os materiais asfálticos é o de Saybolt-Furol ilustrado na Figura 2.12 (Saybolt: o inventor; e Furol: *Fuel Road Oil*; ASTM 102-93, ABNT NBR 14756/2001). Trata-se de uma medida empírica da viscosidade obtida por meio de um aparelho mais robusto para uso em campo, porém não está presente em nenhuma especificação americana ou europeia.

O aparelho consta, basicamente, de um tubo com formato e dimensões padronizadas, no fundo do qual fica um orifício de diâmetro $3,15 \pm 0,02\text{mm}$. O tubo, cheio de material a ensaiar, é colocado num recipiente com óleo (banho) com o orifício fechado. Quando o material estabiliza na temperatura exigida (25 a 170°C dependendo do material e 135°C para os cimentos asfálticos), abre-se o orifício e inicia-se a contagem do tempo. Desliga-se o cronômetro quando o líquido alcança, no frasco inferior, a marca de 60ml. O valor da viscosidade é reportado em segundos Saybolt-Furol, abreviado como SSF, a uma dada temperatura de ensaio.

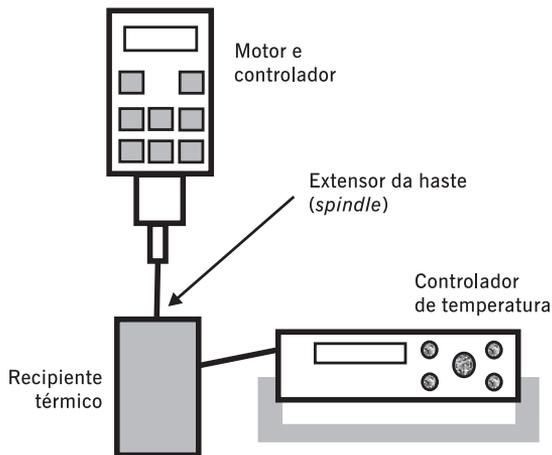
Além do uso na especificação, a medida da viscosidade do ligante asfáltico tem grande importância na determinação da consistência adequada que ele deve apresentar quando da mistura com os agregados para proporcionar uma perfeita cobertura dos mesmos e quando de sua aplicação no campo. Para isso é necessário se obter, para cada ligante asfáltico, uma curva de viscosidade com a temperatura que permita escolher a faixa de temperatura adequada para as diversas utilizações como será visto no Capítulo 5.

Para se fazer esta curva viscosidade-temperatura utilizando-se qualquer um dos equipamentos descritos, é necessário empregar várias amostras, uma para cada temperatura de determinação, o que torna o processo demorado.

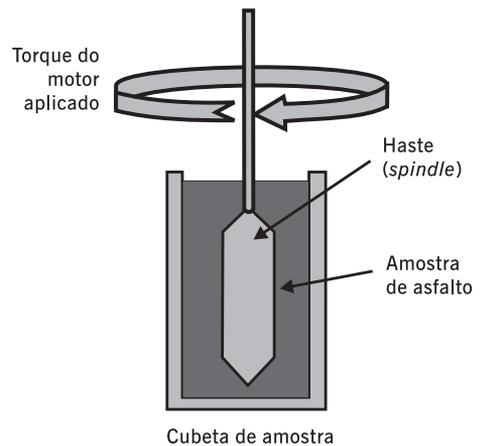
Atualmente, o viscosímetro mais empregado nos Estados Unidos e na Europa para medida da viscosidade de asfaltos é o chamado Brookfield (Figura 2.13) que permite obter a curva viscosidade-temperatura em ampla faixa de determinação com a mesma amostra. Alguns laboratórios brasileiros já possuem equipamento desse tipo que determina a chamada viscosidade rotacional.

O viscosímetro Brookfield permite medir as propriedades de consistência relacionadas ao bombeamento e à estocagem. Permite ainda obter gráfico de temperatura-viscosidade para projeto de mistura asfáltica, por meio de medida do comportamento do fluido a diferentes taxas de cisalhamento e a diferentes tensões de cisalhamento, obtidas por rotação de cilindros coaxiais que ficam mergulhados na amostra em teste (ABNT NBR 15184; ASTM D 4402/02). É uma medida da viscosidade dinâmica expressa em centipoise (cP).

A unidade de medida de viscosidade no sistema internacional é o pascal segundo ($\text{Pa}\cdot\text{s} = 1\text{Ns}/\text{m}^2$); no sistema CGS a unidade é o poise ($P = 1\text{g}/\text{cm}\cdot\text{s} = 0,1\text{Pa}\cdot\text{s}$). O centipoise é equivalente ao milipascal e $1.000\text{cP} = 1\text{Pa}\cdot\text{s}$.



(a) Esquema do equipamento



(b) Esquema do *spindle* na amostra de asfalto



(c) Exemplo de equipamento

Figura 2.13 Equipamento Brookfield para medida de viscosidade de asfaltos e esquemas associados ao extensor

Esse mesmo equipamento pode ser aplicado com vários tipos de hastes (*spindles*) e para cada tipo de material ou faixa de temperatura é preciso especificar por número a haste correta.

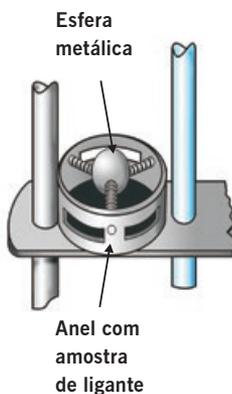
Ensaio de ponto de amolecimento

O ponto de amolecimento é uma medida empírica que correlaciona a temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido sob certas condições particulares e atinge uma determinada condição de escoamento. Trata-se de uma referência semelhante ao chamado ponto de fusão bastante usado na Europa. Uma bola de aço de dimensões e peso especificados é colocada no centro de uma amostra de asfalto que está confinada dentro de um anel metálico padronizado. Todo o conjunto é colocado dentro de um banho de água num béquer. O banho é aquecido a uma taxa controlada de 5°C/minuto. Quando o asfalto amolece o suficiente para não mais suportar o peso da bola, a bola e o asfalto deslocam-se em direção ao fundo do béquer. A temperatura é marcada no instante em que a mistura amolecida toca a placa do fundo do conjunto padrão de ensaio. O teste é conduzido com duas amostras do mesmo material. Se a diferença de temperatura entre as duas amostras exceder 2°C, o ensaio deve ser refeito. A Figura 2.14 ilustra o ensaio e o equipamento utilizado. Devido às condições descritas, esse ensaio é também referenciado como ensaio do anel e bola (ABNT NBR 6560/2000).

Esse ensaio é classificatório em especificações brasileira e européia, e é empregado para estimativa de suscetibilidade térmica, além de também estar presente em especificações de asfaltos modificados e asfaltos soprados.



(a) Equipamento automático



(b) Detalhe esquemático do anel e bola e equipamento manual



Figura 2.14 Equipamento automático para medida do ponto de amolecimento do asfalto e esquema do ensaio com equipamento mais simples

(Fotos: Leite, 2003; Silva, 2005)

Ensaio de ductilidade

A coesão dos asfaltos é avaliada indiretamente pela medida empírica da ductilidade que é a capacidade do material de se alongar na forma de um filamento. Nesse ensaio, corpos-de-prova de ligantes colocados em moldes especiais (em forma de osso de cachorro – *dog bone* – ou gravata-borboleta), separados ao meio na seção diminuída do molde, são imersos em água dentro de um banho que compõe o equipamento (Figura 2.15). A ductilidade é dada pelo alongamento em centímetros obtido antes da ruptura de uma amostra de CAP, na seção diminuída do molde com largura inicial de 10mm, em banho de água a 25°C, submetida pelos dois extremos à velocidade de deformação de 5cm/minuto (ABNT NBR 6293/2001).

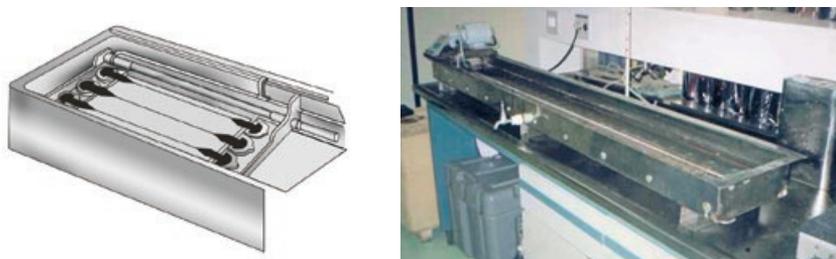


Figura 2.15 Esquema do ensaio de ductilidade em andamento e equipamento completo

Ensaio de solubilidade

Uma amostra do asfalto é dissolvida por um solvente, sendo então filtrada através de um cadinho perfurado que é montado no topo de um frasco ligado ao vácuo. A quantidade de material retido no filtro representa as impurezas no cimento asfáltico (ASTM D 2042, ABNT NBR 14855/2002), conforme ilustrado na Figura 2.16.

O ensaio de solubilidade no bissulfeto de carbono é utilizado para medir a quantidade de betume presente na amostra de asfalto. O cimento asfáltico refinado consiste basicamente de betume puro, que, por definição, é inteiramente solúvel em bissulfeto de carbono (S_2C). Para determinar o grau de pureza do asfalto (teor de betume), é realizado o ensaio de solubilidade. As especificações para asfaltos de pavimentação geralmente requerem um mínimo de 99,0% do asfalto solúvel em tricloroetileno (é mais usual uma vez que o bissulfeto de carbono é muito tóxico). A porção insolúvel é constituída de impurezas.

Ensaio de durabilidade

Os asfaltos sofrem envelhecimento (endurecimento) de curto prazo quando misturados com agregados minerais em usinas devido a seu aquecimento. O envelhecimento de longo prazo do ligante ocorre durante a vida útil do pavimento que estará submetido a diversos fatores ambientais. Os ensaios de envelhecimento acelerado designados de “efeito do calor e do ar” são usados para tentar simular o envelhecimento do ligante na usinagem.

O ensaio de efeito do calor e do ar (ECA) como é conhecido no Brasil (ABNT NBR 14736/2001) corresponde ao designado no exterior como ensaio de estufa de filme fino – *Thin Film Oven Test* – TFOT (ASTM D 1754) ou ensaio de película delgada. Consiste



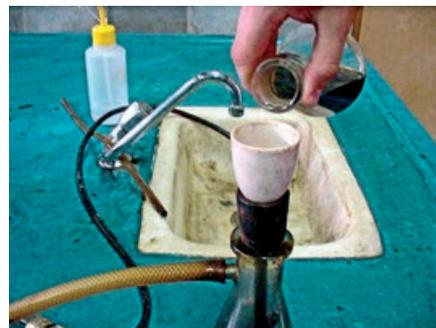
(a) Conjunto de equipamentos para o ensaio



(b) Cadinho com papel-filtro no interior e erlenmeyer com a amostra antes da filtragem



(c) Amostra dissolvida em tricloroetileno para filtragem no cadinho



(d) Filtragem, com auxílio de vácuo, da amostra dissolvida em tricloroetileno

Figura 2.16 Equipamentos e arranjo experimental para o ensaio de solubilidade

(Fotos: Silva, 2005)

em submeter amostras do ligante, colocadas em película de pequena espessura dentro de um recipiente padronizado, a um certo tempo de solicitação de temperatura elevada e jatos de ar, por exposição dentro de uma estufa especial. A Figura 2.17 mostra uma estufa empregada para a realização desse ensaio.

A estufa de película fina plana (TFOT) provoca o envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação e evaporação, permitindo avaliar a presença de frações de óleos mais leves e a oxidação que ocorre durante o aquecimento a 163°C durante 5 horas. Esse ensaio procura simular o efeito do envelhecimento do ligante que ocorre durante a usinagem e compactação da mistura. Mede-se o efeito do envelhecimento acelerado nas modificações das características de penetração, ductilidade ou viscosidade do ligante envelhecido em relação ao ligante original.

Hveem *et al.* (1963) propuseram um novo ensaio de avaliação do envelhecimento do asfalto para substituir o ensaio TFOT que passou a ser conhecido como *Rolling Thin Film Oven Test* – estufa de filme fino rotativo (RTFOT) ou película delgada rotacional. Esse ensaio também mede o envelhecimento por oxidação e evaporação, porém de forma mais severa por estar continuamente expondo nova porção do ligante ao efeito do ar. Nesse ensaio, uma fina película de asfalto de 35g é continuamente girada dentro de um recipiente de vidro a 163°C por 85 minutos, com uma injeção de ar a cada 3 a 4 segundos. O endureci-

mento do asfalto durante o ensaio, que causa queda na penetração e aumento no ponto de amolecimento, de acordo com dados reportados na literatura, tem-se correlacionado bem com o endurecimento do ligante que ocorre durante a usinagem de uma mistura asfáltica. O RTFOT, que está padronizado pela ASTM desde 1970 (ASTM D 2872-97), e pela Shell desde 1973, recentemente foi incluído como parte da especificação da Comunidade Européia (EN 12591/2000) e, em 2005, foi aprovada no Brasil a especificação ABNT NBR 15235/2005, substituindo o ensaio ECA na caracterização de ligantes asfálticos. A Figura 2.18 mostra uma estufa RTFOT empregada no ensaio de envelhecimento acelerado.

Há muitos mecanismos envolvidos no envelhecimento dos ligantes asfálticos, porém dois são mais relevantes: a perda de componentes voláteis (saturados e aromáticos) e a reação química do asfalto com o oxigênio do ar. É importante se ter um parâmetro que avalie o potencial de envelhecimento de cada ligante nas várias fases de utilização:

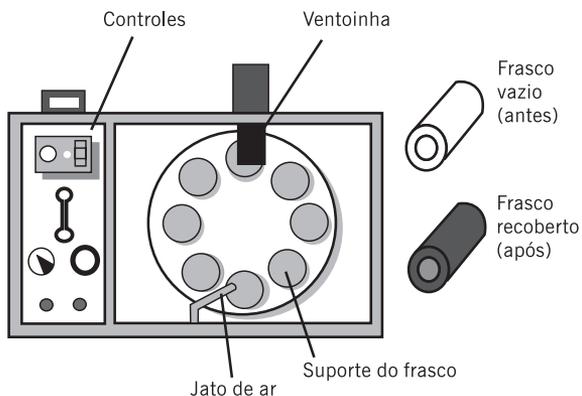


(a) Estufa TFOT



(b) Placa rotativa, prato e termômetro

Figura 2.17 Estufa de película fina plana (TFOT) para medidas do efeito do calor e do ar (ECA) em ensaio de envelhecimento de ligante asfáltico simulado em laboratório



(a) Esquema de RTFOT



(b) Exemplo de RTFOT

Figura 2.18 Estufa de filme fino rotativo ou película delgada rotacional (Rolling Thin Film Oven Test – RTFOT)

estocagem, usinagem, transporte, compactação e vida de serviço. Porém, há uma complexidade para a avaliação do envelhecimento nessas diversas fases de utilização, sendo referida mais simplesmente a avaliação de seu efeito nas características físicas, que levam ao endurecimento do ligante verificado pela diminuição da penetração e aumento do ponto de amolecimento e da viscosidade. Dessa forma, o efeito do envelhecimento ou potencial do envelhecimento é avaliado como uma relação entre as características físicas de fácil medição antes e após o processo de envelhecimento ou em diversas idades.

A Figura 2.19 mostra um exemplo de um gráfico de medida do efeito do envelhecimento nas várias etapas de uso do ligante, feita por um índice de envelhecimento que é a relação entre a viscosidade a cada tempo (η_t) e a viscosidade inicial (η_0) do ligante recém-produzido (Whiteoak, 1980, apud Shell, 2003). As maiores perdas ocorrem durante a usinagem, transporte e compactação. Nessas etapas o ligante é submetido simultaneamente aos três fatores necessários para que ocorra o envelhecimento acelerado: altas temperaturas, elevada relação área superficial de agregados e volume de ligante (baixa espessura de película) e exposição ao ar (mistura solta) (Tonial, 2001). Os efeitos do envelhecimento do ligante nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas serão discutidos nos próximos capítulos.

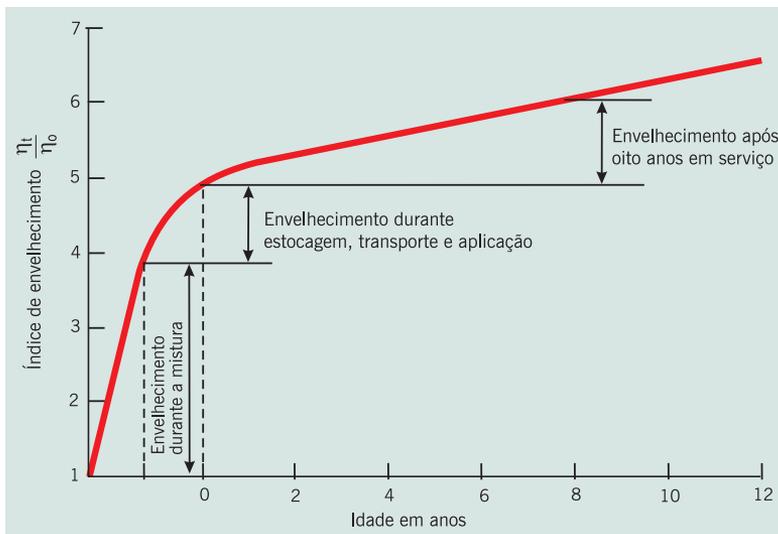


Figura 2.19 Envelhecimento do ligante durante a mistura com o agregado em usina, estocagem, transporte, aplicação no campo e durante vários anos de serviço (Whiteoak, 1980, apud Shell, 2003)

Ensaio de ponto de fulgor

O ponto de fulgor é um ensaio ligado à segurança de manuseio do asfalto durante o transporte, estocagem e usinagem. Representa a menor temperatura na qual os vapores emanados durante o aquecimento do material asfáltico se inflamam por contato com uma chama padronizada. Valores de pontos de fulgor de CAP são normalmente superiores a 230°C. A Figura 2.20 mostra um arranjo esquemático do ensaio e foto de equipamento utilizado para executá-lo segundo a norma ABNT NBR 11341/2004.

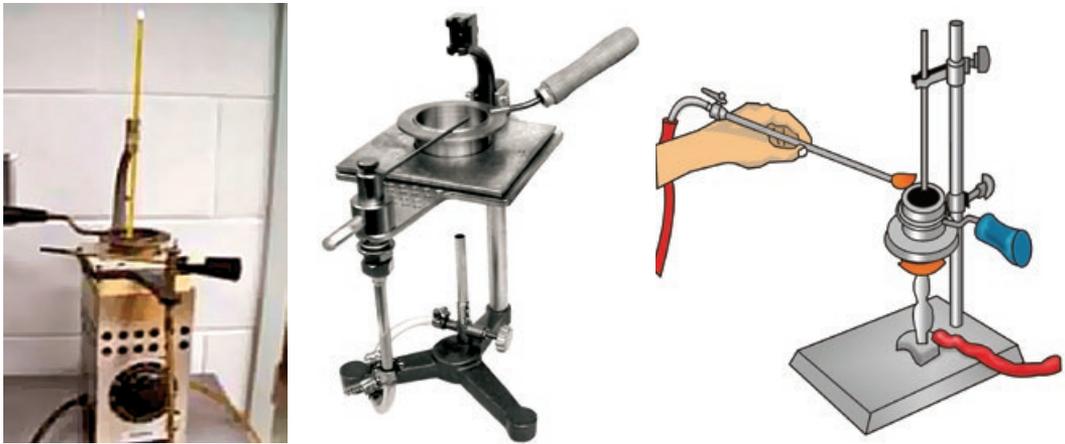


Figura 2.20 Modelos de equipamentos para o ensaio e esquema do ensaio de ponto de fulgor pelo vaso aberto de Cleveland

Ensaio de espuma

O CAP não deve conter água pois, ao ser aquecido, pode formar espuma causando explosões visto que há dificuldade do material de liberar as bolhas de água aquecidas, que, ao forçarem a liberação, podem lançar gotículas de asfalto a longas distâncias. A presença de água no asfalto pode causar acidentes nos tanques e no transporte. Não há um ensaio determinado, mas avaliação qualitativa. A especificação brasileira de CAP vigente até julho de 2005 tem uma observação de que o ligante não pode espumar quando aquecido até 175°C. Em algumas rotas de fabricação de CAP no passado era até usado um produto antiespumante para satisfazer essa condição, dependendo do processo de refino e do petróleo.

Mais recentemente porém tem sido utilizada uma técnica chamada de asfalto-espuma ou espuma de asfalto para uso em reciclagem de pavimentos que utiliza essa característica do ligante aquecido de espumar em presença de água, para, em condições controladas, provocar a espumação por jatos externos de água sobre o CAP aquecido (ver item 2.7).

Ensaio de massa específica e densidade relativa

A massa específica do ligante asfáltico é obtida por meio de picnômetro para a determinação do volume do ligante e é definida como a relação entre a massa e o volume. A Figura 2.21 apresenta as etapas do ensaio. A massa específica e a densidade relativa do CAP devem ser medidas e anotadas para uso posterior na dosagem das misturas asfálticas. Os ligantes têm em geral massa específica entre 1 e 1,02g/cm³.

O ensaio é realizado de acordo com a norma ABNT NBR 6296/2004. A densidade relativa é a razão da massa específica do asfalto a 20°C pela massa específica da água a 4°C, que é de aproximadamente 1g/cm³. A finalidade é a conversão de massas em volumes durante os cálculos de determinação do teor de projeto de ligante numa mistura asfáltica.



(a) Picnômetros com asfalto e água



(b) Determinação da massa do picnômetro totalmente preenchido com água a 25°C



(c) Determinação da massa do picnômetro preenchido até a metade com asfalto a 25°C



(d) Determinação da massa do picnômetro preenchido metade com água e metade com asfalto, a 25°C

Figura 2.21 Etapas do ensaio de massa específica do ligante

(Fotos: Silva, 2005)

Ensaio de ponto de ruptura Fraass

Em 1937 o pesquisador Fraass propôs um método de ensaio para qualificar o asfalto sob condição de temperaturas negativas, que consiste basicamente em buscar determinar a temperatura que leva o ligante a uma rigidez crítica que resulta em trincamento. Muitos países que têm invernos muito rigorosos como, por exemplo, Canadá, Finlândia, Noruega, Alemanha e Suécia, têm valores máximos de “temperatura Fraass” nas especificações de asfaltos.

É a temperatura na qual o CAP, quando submetido à flexão, tende mais pronunciadamente a romper do que a fluir. No ensaio, uma placa de aço de 41mm × 20mm, revestida de uma fina camada de CAP, flexionada sob condições padronizadas, é submetida a temperaturas decrescentes. O ponto de ruptura é a temperatura em que aparece a primeira fissura na película de CAP. Esse ensaio mede a temperatura mínima na qual o material resiste à flexão. Tem sido também utilizado nas especificações de asfaltos modificados por polímero. A Figura 2.22 mostra um equipamento empregado para a realização deste ensaio. A Comunidade Européia possui a norma EN 12593/2000 para

a medida da temperatura Fraass; no entanto, devido às nossas condições climáticas, não há norma brasileira para a mesma. A temperatura Fraass pode ser estimada pelo ensaio de penetração admitindo-se que haja uma correspondência com a penetração de 1,25.

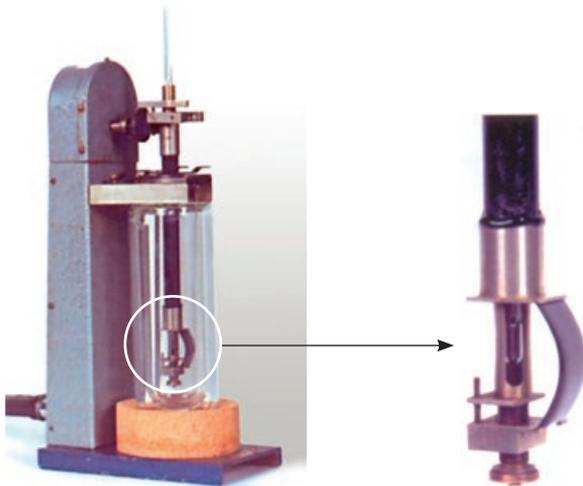


Figura 2.22 Equipamento de ensaio de ponto de ruptura Fraass

(Foto: Cenpes)

Suscetibilidade térmica

A suscetibilidade térmica indica a sensibilidade da consistência dos ligantes asfálticos à variação de temperatura. Trata-se de uma propriedade importante dos ligantes asfálticos uma vez que se eles forem muito suscetíveis à variação de estado ou de propriedades frente à variação de temperatura, não serão desejáveis na pavimentação. É desejável que o ligante asfáltico apresente variações pequenas de propriedades mecânicas, nas temperaturas de serviço dos revestimentos, para evitar grandes alterações de comportamento frente às variações de temperatura ambiente.

Diferentes abordagens podem ser usadas para se determinar a suscetibilidade térmica dos ligantes. Normalmente tem-se calculado para essa finalidade o Índice de Suscetibilidade Térmica ou Índice de Penetração. Pelo procedimento proposto em 1936 por Pfeiffer e Van Doormaal esse índice é determinado a partir do ponto de amolecimento (PA) do CAP e de sua penetração a 25°C, incluindo-se a hipótese que a penetração do CAP no seu ponto de amolecimento é de 800 (0,1mm). Muitos autores têm reportado que a penetração de um grande número de CAPs no seu PA pode diferir consideravelmente de 800, principalmente nos casos de CAPs com altos valores de PA. Portanto, é prudente medir-se a penetração em alguma outra temperatura em adição à medida a 25°C, em vez de admitir a hipótese mencionada. Os pontos correspondentes ao logaritmo da penetração pela respectiva temperatura do ensaio, sendo que as penetrações são determinadas em duas temperaturas diferentes, são grafados, fornecendo uma reta como resultado. O coeficiente angular da reta α é dado por:

$$\tan \alpha = \frac{\log(P_{T_1}) - \log(P_{T_2})}{T_1 - T_2} \quad (2.5)$$

Onde:

P_{T_i} = penetração em 0,1mm medida à temperatura de ensaio T_i ;

T_i = temperatura de ensaio ($^{\circ}\text{C}$).

A seguinte relação empírica é utilizada para determinar o *Índice de Suscetibilidade Térmica* ou *Índice de Penetração IP*:

$$IP = \frac{20 - 500(\tan \alpha)}{1 + 50(\tan \alpha)} \quad (2.6)$$

Como exemplo, considere a penetração de um CAP a 25°C como 120 (0,1mm) e a $4,4^{\circ}\text{C}$ como 10 (0,1mm). O valor do IP será:

$$\tan \alpha = \frac{\log(120) - \log(10)}{25 - 4,4} = 0,052 \Rightarrow IP = \frac{20 - 500(0,052)}{1 + 50(0,052)} = -1,67 \quad (2.7)$$

Quanto menor o IP de um cimento asfáltico, em valor absoluto, menor será a sua suscetibilidade térmica. A atual norma brasileira que classifica os CAPs estabelece uma faixa admissível para o IP entre (-1,5) e (+0,7) – item 2.3 deste capítulo.

A maioria dos cimentos asfálticos tem um IP entre (-1,5) e (0). Valores maiores que (+1) indicam asfaltos oxidados (pouco sensíveis a elevadas temperaturas e quebradiços em temperaturas mais baixas); valores menores que (-2) indicam asfaltos muito sensíveis à temperatura.

Assumindo a hipótese da penetração (P) de qualquer CAP à temperatura correspondente ao ponto de amolecimento (PA) ser próxima de 800 (0,1mm), conforme Pfeiffer e Van Doormaal, a suscetibilidade térmica é definida simplesmente a partir da expressão (2.8), que é a forma de estimativa da suscetibilidade térmica dos ligantes que consta da especificação brasileira de CAP:

$$IP = \frac{20 - 500(\tan \alpha)}{1 + 50(\tan \alpha)} = \frac{500 \log(P) + 20 PA - 1951}{120 - 50 \log(P) + PA} \quad (2.8)$$

Sendo:

$$\tan \alpha = \frac{\log(800) - \log(P)}{PA - 25} \quad (2.9)$$

Outra forma de se avaliar as mudanças físicas dos ligantes com a temperatura é utilizando um gráfico especial conhecido como BTDC (*Bitumen Test Data Chart*) ou gráfico de Heukelom (1969), cuja característica principal é combinar os dados de penetração,

ponto de amolecimento e viscosidade num mesmo espaço, de forma que, combinando escalas escolhidas especialmente, seja possível avaliar se o ligante será adequado para uso em pavimentação, sob o ponto de vista da trabalhabilidade e da capacidade de envolver os agregados. Também permite a escolha da faixa de temperatura a ser empregada na mistura com os agregados e na compactação. Na Figura 2.23 é mostrado um exemplo esquemático desse gráfico, com várias possibilidades de resultados de ensaios ilustrando os tipos adequados e não-adequados para pavimentação, segundo esse critério. Para desenhar esse gráfico são necessárias escalas especiais; uma escala linear horizontal de temperatura e duas escalas verticais, sendo uma para plotar a penetração (logarítmica) e outra para a viscosidade (escala especial ajustada), especialmente desenhadas para esse fim.

Sob algumas condições, admite-se que todos os ligantes teriam uma penetração de 800 (0,1mm) e viscosidade de 1200Pa.s à temperatura correspondente ao ponto de amolecimento, o que pode não ser verdadeiro para todos os ligantes, como já comentado. A avaliação da suscetibilidade térmica do ligante pelo gráfico de Heukelom é mais adequada do que pelo IP, calculado a partir de penetração a 25°C e PA, segundo muitos autores (por ex. Shell, 2003).

Pelo gráfico BTDC é possível distinguir três tipos ou classes de ligantes asfálticos, conforme esboçado na Figura 2.23, classe S, classe B e classe W. O grupo designado como classe S (S de *straight line* – linha reta) representa os asfaltos de diferentes origens, com quantidade limitada de parafina e que terão a suscetibilidade térmica expressa por inclinações variáveis dessa reta, mas que podem ter suas características da viscosidade variando com a temperatura, obtidas através do ponto de amolecimento e penetração somente. Representam asfaltos adequados para pavimentação.

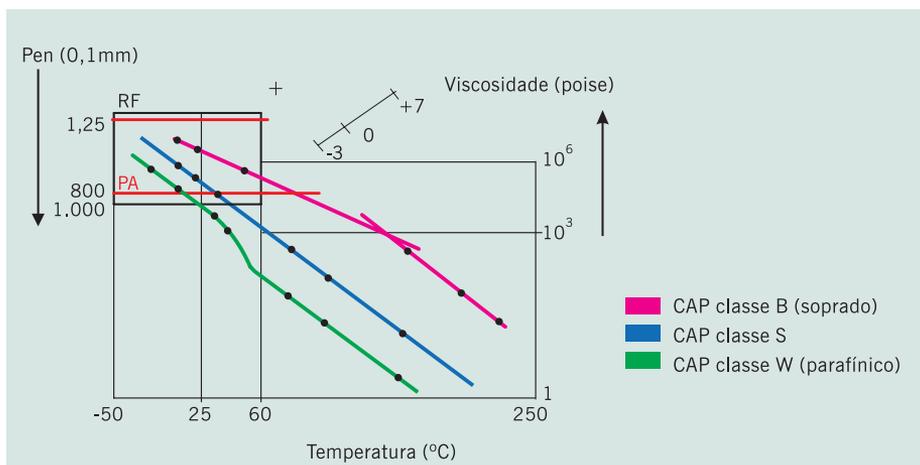


Figura 2.23 Exemplo esquemático de gráfico de Heukelom para classificação de ligantes asfálticos (BTDC)

Os asfaltos classe B (*blown* – soprado) apresentam curvas no gráfico BTDC que são duas retas concorrentes, indicando que as propriedades nas temperaturas altas não variam na mesma proporção do que nas temperaturas baixas. Nesse caso, é necessária a realização de ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade em duas temperaturas para conhecer adequadamente o comportamento do ligante em ampla faixa de temperatura.

Os asfaltos da classe W (*waxy* – parafínico) também apresentam duas curvas no gráfico BTDC, porém que têm inclinações parecidas, embora não alinhadas numa mesma posição do gráfico pela influência do comportamento diferenciado da parafina nas condições de baixas e de altas temperaturas.

Outra maneira de verificar o efeito das parafinas no ligante foi desenvolvida pela Shell em 1989. A definição do cimento asfáltico tipo S, considerado bom para pavimentação, foi ligeiramente alterada da tradicional linha reta onde as retas de penetração *versus* temperatura e viscosidade *versus* temperatura são coincidentes. Por razões práticas o seguinte critério é usado para classificar os cimentos asfálticos em tipo S ou tipo W (*wax*):

$$\Delta T = (T_{13.000P} - T_{PA})^{\circ}C \quad (2.10)$$

Onde:

$T_{13.000P}$ = temperatura cuja viscosidade é 13.000P;

T_{PA} = temperatura de ponto de amolecimento.

Critério:

$$\Delta T \leq 8^{\circ}C \quad (2.11)$$

Se o parâmetro ΔT da expressão 2.11 for atendido, o CAP apresenta comportamento tipo S, caso contrário apresenta comportamento tipo W. Esse parâmetro tem correlação com o teor de parafinas cristalizáveis, determinado através do DSC.

2.3 ESPECIFICAÇÕES BRASILEIRAS

A penúltima especificação brasileira de CAP, vigente de 1992 até julho de 2005, separava em duas famílias de ligantes, os especificados por penetração e os especificados pela viscosidade absoluta, considerando requisitos para esses parâmetros e para outros ensaios físicos entre os descritos no item anterior. As Tabelas 2.2 e 2.3 mostram as especificações que foram vigentes até 2005. Por viscosidade os asfaltos brasileiros eram subdivididos em três grupos: CAP 7, CAP 20 e CAP 40, sendo esses números associados ao início da faixa de viscosidade de cada classe. Por penetração, havia quatro classes de asfalto: CAP 30-45, CAP 50-60, CAP 85-100 e CAP 150-200, sendo esses números associados à faixa de penetração obtida no ensaio.

Os intervalos entre as classes foram criados somente para resolver a questão comercial dos preços de cada uma delas.

A razão de viscosidade referida na especificação, das Tabelas 2.2 e 2.3, é dada por:

$$\text{Razão de Viscosidade} = \frac{\text{Viscosidade a } 60^{\circ}\text{C após RTFOT ou TFOT}}{\text{Viscosidade a } 60^{\circ}\text{C antes RTFOT ou TFOT}}$$

O Índice de Suscetibilidade citado nas Tabelas 2.2 e 2.3 refere-se ao obtido pela expressão 2.7, de Pfeiffer e Van Doormaal.

Em julho de 2005 foi aprovada pela Agência Nacional de Petróleo, Gás e Energia (ANP) uma nova especificação de CAP para todo o Brasil, em substituição às duas anteriores mostradas. Essa nova especificação baseia-se na penetração e nos ensaios vistos anteriormente e é apresentada na Tabela 2.4.

A título comparativo apresenta-se na Tabela 2.5 a especificação de CAP da Comunidade Européia, acordada entre os países-membros em 2000, com as exigências mínimas para asfaltos para pavimentação, dada pela especificação EN 12591/2000. Os ensaios e respectivos valores admissíveis dessa tabela podem ser acrescidos de outras exigências adicionais em cada país-membro da Comunidade Econômica Européia (CEE). Essa especificação está atualmente em revisão e será substituída por critérios de desempenho, seguindo a tendência do Superpave.

2.4 ASFALTO MODIFICADO POR POLÍMERO

Para a maioria das aplicações rodoviárias, os asfaltos convencionais têm bom comportamento, satisfazendo plenamente os requisitos necessários para o desempenho adequado das misturas asfálticas sob o tráfego e sob as condições climáticas. No entanto, para condições de volume de veículos comerciais e peso por eixo crescente, ano a ano, em rodovias especiais ou nos aeroportos, em corredores de tráfego pesado canalizado e para condições adversas de clima, com grandes diferenças térmicas entre inverno e verão, tem sido cada vez mais necessário o uso de modificadores das propriedades dos asfaltos. Entre esses, citam-se asfaltos naturais, gilsonita ou asfaltita, mas especialmente polímeros de vários tipos que melhoram o desempenho do ligante.

Mano (1985, 1991) apresenta as seguintes definições de polímeros e macromoléculas:

- macromoléculas são moléculas gigantescas que resultam do encadeamento de dez mil ou mais átomos de carbono, unidos por ligações covalentes, podendo ser naturais (madeira, borracha, lã, asfalto etc.) ou sintéticas (plásticos, borrachas, adesivos etc.);
- polímeros (do grego “muitas partes”) são macromoléculas sintéticas, estruturalmente simples, constituídas de unidades estruturais repetidas em sua longa cadeia, denominadas monômeros. Os homopolímeros são constituídos por apenas um monômero, e os copolímeros são os que apresentam pelo menos dois monômeros em sua estrutura.

TABELA 2.2 ESPECIFICAÇÕES PARA CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP)
Classificação por penetração (Portaria DNC 5 de 18/2/1993) vigente até julho de 2005

Características	Unidade	Valores			
		CAP 30-45	CAP 50-60	CAP 85-100	CAP 150-200
Penetração (100g,5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 60	85 a 100	150 a 200
Dutilidade a 25°C, mín.	cm	60	60	100	100
Índice de Suscetibilidade Térmica		(-1,5) a (+1)	(-1,5) a (+1)	(-1,5) a (+1)	(-1,5) a (+1)
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	220
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5
Viscosidade Saybolt-Furol, 135°C, mín.	s	110	110	85	70
Efeito do calor e do ar, 163°C por 5h					
Penetração, mín.	%	50	50	47	40
Varição em massa, máx.	%	1,0	1,0	1,0	1,0

TABELA 2.3 ESPECIFICAÇÕES PARA CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP)
Classificação por viscosidade (Portaria DNC 5 de 18/2/93) vigente até julho de 2005

Características	Unidade	Valores		
		CAP-7	CAP-20	CAP-40
Viscosidade a 60°C	P	700 a 1.500	2.000 a 3.500	4.000 a 8.000
Viscosidade Saybolt-Furol, 135°C, mín.	s	100	120	170
Viscosidade Saybolt-Furol, 177°C	s	15 a 60	30 a 150	40 a 150
Dutilidade a 25°C, mín.	cm	50	20	10
Índice de Suscetibilidade Térmica		(-1,5) a (+1)	(-1,5) a (+1)	(-1,5) a (+1)
Penetração (100g, 5s, 25°C), mín.	0,1mm	90	50	30
Ponto de fulgor, mín.	°C	220	235	235
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5
Densidade (20/4°C), mín.		0,9990	0,9990	0,9990
Efeito do calor e do ar, 163°C por 5h				
Razão de viscosidade, máx.		4,0	4,0	4,0
Varição em massa, máx.	%	1,0	1,0	1,0

TABELA 2.4 NOVA ESPECIFICAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP) (ANP, 2005)

Características	Unidade	Limites				Métodos	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-Furol							
a 135°C, mín.	s	192	141	110	80	NBR 14950	E 102
a 150°C, mín.		90	50	43	36		
a 177°C		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60		
Viscosidade Brookfield							
a 135°C, mín. SP 21, 20rpm, mín.	cP	374	274	214	155	NBR 15184	D 4402
a 150°C, mín.		203	112	97	81		
a 177°C, SP 21		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114		
Índice de Suscetibilidade Térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	–	–
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Dutilidade a 25°C, mín.	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
Efeito do calor e do ar a 163°C por 85 minutos							
Varição em massa, máx.	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		D 2872
Dutilidade a 25°C, mín.	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín. (*)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

(*) Relação entre a penetração após o efeito do calor e do ar em estufa RTFOT e a penetração original, antes do ensaio do efeito do calor e do ar.

TABELA 2.5 ESPECIFICAÇÃO DE ASFALTOS PARA PAVIMENTAÇÃO DA COMUNIDADE EUROPEIA (EN 12591/2000)

Ensaio	Unidade	Método	Designação da classe								
			20/30	30/45	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/220	250/330
Penetração a 25°C	0,1mm	EN 1426	20-30	30-45	35-50	40-60	50-70	70-100	100-150	160-220	250-330
Ponto de amolecimento	°C	EN 1427	55-63	52-60	50-58	48-56	46-54	43-51	39-47	35-43	30-38
Resistência ao endurecimento a 163°C (efeito do calor e do ar)											
Variação em massa, máx. (±)	%	EN 12607-1 ou 3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	1,0	1,0
Penetração retida, mín.	%		55	53	53	50	50	46	43	37	35
Ponto de amolecimento, mín.	°C		57	54	52	49	48	45	41	37	32
Ponto de fulgor, mín.	°C	EN 22592	240	240	240	230	230	230	230	220	220
Solubilidade, mín.	%	EN 12592	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0

O comportamento do polímero sintético depende dos materiais de partida (monômeros), do tipo de reação empregado para sua obtenção e da técnica de preparação. Os tipos de reação empregados são:

- poliadição, por exemplo, SBR (borracha estireno-butadieno) e EVA (etileno-acetato de vinila);
- policondensação, por exemplo, ER e PET;
- modificação química de outro polímero, por exemplo, SBS (estireno-butadieno-estireno).

Quanto ao seu comportamento frente às variações térmicas, os polímeros são classificados em categorias como sugerido por Mano (1985, 1991) e Leite (1999):

- *termorrígidos*: são aqueles que não se fundem, sofrem degradação numa temperatura limite e endurecem irreversivelmente quando aquecidos a uma temperatura que depende de sua estrutura química. Apresentam cadeias moleculares que formam uma rede tridimensional que resiste a qualquer mobilidade térmica. Por exemplo: resina epóxi, poliéster, poliuretano;
- *termoplásticos*: são aqueles que se fundem e tornam-se maleáveis reversivelmente quando aquecidos. Normalmente consistem de cadeias lineares, mas podem ser também ramificadas. São incorporados aos asfaltos a alta temperatura. Por exemplo: polietileno, polipropileno, PVC;
- *elastômeros*: são aqueles que, quando aquecidos, se decompõem antes de amolecer, com propriedades elásticas. Por exemplo: SBR;

- *elastômeros termoplásticos*: são aqueles que, a baixa temperatura, apresentam comportamento elástico, porém quando a temperatura aumenta passam a apresentar comportamento termoplástico. Por exemplo: SBS e EVA.

Nem todos os polímeros são passíveis de serem adicionados ao CAP e nem todo CAP quando modificado por polímeros apresenta estabilidade à estocagem. Os asfaltos que melhor se compatibilizam com polímeros são aqueles que apresentam uma certa aromaticidade. A quantidade de polímero que deve ser adicionada ao ligante é variável e depende das propriedades finais desejadas. É necessário também verificar a adequada dispersão do polímero no CAP, de forma que a matriz polimérica fique fixada na estrutura do asfalto, ocluída nas malhas do mesmo.

Grande parte dos trabalhos de pavimentação atualmente refere-se à manutenção e ao reforço de rodovias existentes, havendo também maior preocupação com a qualidade da superfície quanto ao conforto e à segurança dos usuários em todas as condições climáticas; nesses casos, o desenvolvimento de novas concepções de misturas asfálticas tem exigido a utilização de asfaltos modificados. O uso de asfaltos modificados por polímeros pode reduzir a frequência das manutenções e aumentar a vida de serviço de pavimentos de locais de difícil acesso ou de custo muito elevado de interrupção do tráfego para reparos. Locais de tráfego canalizado também podem se beneficiar com o uso de asfaltos modificados.

O grau de melhoria e modificação do ligante e, em conseqüência, o seu custo dependem das necessidades do local onde será aplicado, considerando se é obra nova ou reforço, variações térmicas e cargas mecânicas às quais o trecho estará submetido, potencial para deformação permanente ou fadiga etc.

Como o asfalto é um material termoviscoelástico, suas características vão influenciar diretamente o desempenho das misturas asfálticas, tanto de deformação permanente quanto de fadiga. As deformações resultantes das cargas aplicadas, ou seja, as respostas da mistura asfáltica aos pulsos de carga gerados pelo tráfego em movimento podem ser bastante modificadas pela presença de polímeros no ligante, aumentando ou diminuindo as parcelas de viscosidade e de elasticidade do conjunto, para várias faixas de temperatura.

Já por muitas décadas vários pesquisadores têm tentado desenvolver usos industriais de vários modificadores de asfalto, tais como: fíleres especiais, fibras e borrachas, por exemplo. Nos últimos 30 anos, com o desenvolvimento de vários polímeros diferentes, as modificações do ligante tomaram impulso significativo.

Para que a modificação do ligante seja viável técnica e economicamente, é necessário que o polímero seja resistente à degradação nas temperaturas usuais de utilização do asfalto, misture-se adequadamente com o asfalto, melhore as características de fluidez do asfalto a altas temperaturas, sem que o ligante fique muito viscoso para a misturação e espalhamento, nem tão rígido ou quebradiço a baixas temperaturas.

O asfalto-polímero tem que manter suas propriedades durante a estocagem, aplicação

e serviço, deve poder ser processado nos equipamentos convencionais, permanecer estável, física e quimicamente, ao longo de todas as fases e não necessitar de temperaturas muito diferenciadas para aplicação.

Na Europa, particularmente na Alemanha, misturas asfálticas feitas com asfalto modificado por polímero foram introduzidas na década de 1970. Nessa época, foram utilizados na Itália revestimentos asfálticos com polietileno adicionado na própria usina misturadora.

O ramo rodoviário brasileiro começou a cogitar a utilização de ligantes modificados por polímero a partir de 1974 quando uma primeira experiência com CAP modificado com resina epóxi foi aplicada em um trecho de 275m na BR-116, Rio-São Paulo. Logo em seguida foi feita uma aplicação, na ponte Rio-Niterói, de asfalto com 15% de resina epóxi líquida mais 40% de extrato aromático e mais um reticulador, uma mistura que alterou profundamente o asfalto, mas ficou muito onerosa, justificando-se seu emprego somente em obras muito especiais como é o caso da Ponte Rio-Niterói com seu tabuleiro metálico. Houve em seguida uma experiência no Aeroporto Santos Dumont, um pequeno trecho na Avenida Atlântica e outro na Avenida Brasil, todos no Rio de Janeiro e com látex introduzido diretamente no tambor misturador da usina de concreto asfáltico, o que não foi muito eficiente e resultou em heterogeneidade da mistura final. Na forma de emulsão asfáltica modificada por polímero, a primeira experiência, ainda nos anos 1980, foi para uso em lama asfáltica e pintura de ligação no Autódromo de Jacarepaguá (Pinto e Farah, 1983). Nesse mesmo autódromo foi feita uma segunda aplicação de mistura asfáltica com polímero SBS entre 1996 e 1997, utilizando asfalto com SBR para a pintura de ligação.

Trabalhos pioneiros envolvendo mistura de asfalto com polímero foram efetuados também pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER no Rio de Janeiro em 1990, que recobriu um trecho de cerca de 300m da Rua Leopoldo Bulhões com mistura asfáltica com asfalto modificado por copolímero SBS e outros 300m com asfalto modificado por copolímero EVA em comparação com trechos com ligante tradicional (Ramos *et al.*, 1995).

A companhia Ipiranga, em seu segmento dedicado a asfaltos, também investiu no asfalto-polímero e desde 1997 está comercializando asfaltos modificados por SBS. A Petrobras iniciou a comercialização de asfaltos modificados por SBS e SBR a partir de 1998 (Leite, 1999).

A Tabela 2.6 mostra em termos qualitativos as influências de vários tipos de modificadores de asfalto no comportamento da mistura asfáltica no pavimento ao longo da vida útil, considerando defeitos de deformação permanente, fadiga, trincas térmicas, envelhecimento e adesividade (Shell, 2003).

2.4.1 Polímeros mais comuns para uso em pavimentação

O grupo de polímeros termoplásticos normalmente usados em modificação de CAP consiste de copolímeros em bloco de estireno-butadieno (SB), estireno-butadieno-estireno (SBS), estireno-isopreno-estireno (SIS), estireno-etileno-butadieno-estireno (SEBS),

TABELA 2.6 BENEFÍCIOS DE DIFERENTES TIPOS DE MODIFICADORES DE ASFALTO (modificado de Shell, 2003)

Modificador	Deformação Permanente	Trincas Térmicas	Trincas de Fadiga	Dano por Umidade	Envelhecimento
Elastômeros	*	*	*		*
Plastômeros	*				
Borracha de pneu	*	*	*		*
Negro-de-fumo	*				*
Cal				*	*
Enxofre	*				
Modificadores químicos	*				
Antioxidante					*
Melhorador de adesividade				*	*
Cal hidratada				*	*

(*) Símbolo significa que há benefício.

acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) e acetato de vinila (EVA). As Figuras 2.24 e 2.25 mostram a representação esquemática de alguns desses polímeros.

Porém, não basta conhecer somente o nome genérico do polímero, pois muitos deles têm apresentação comercial diferenciada, tanto na formulação e obtenção das cadeias como na forma de apresentação, se granulado grosso ou fino, pó fino, líquido etc.

O copolímero SBS é comercializado tanto em forma de pó como em grânulos e, por exemplo, existe o da Shell tipo linear TR1101, produzido no Brasil, e o estrelado TR1186 importado, ambos com cerca de 30% de estireno. Os copolímeros em bloco SBS da Petroflex, fabricados no Brasil, são do tipo linear Coperflex 2032, 2040 e TR-D101. O



Figura 2.24 Representação esquemática da estrutura de um elastômero termoplástico à temperatura ambiente (Shell, 2003)

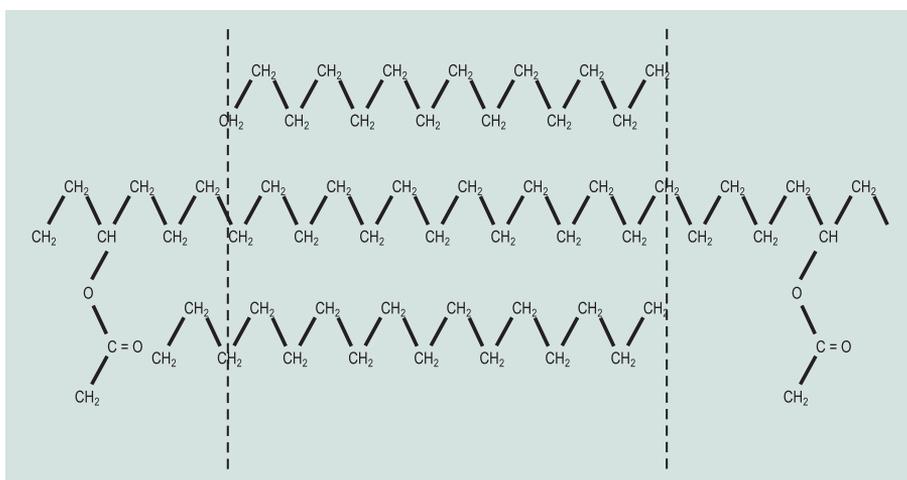


Figura 2.25 Representação esquemática de um elastômero termoplástico EVA

polímero SBR em geral é em forma de látex e EVA e LDPE (polietileno de baixa densidade) em grânulos. Os copolímeros EVA fornecidos pela Politen são denominados HM728, CEVA38 e 3019PE, com teor de acetato de vinila de 28, 19 e 19%, respectivamente. O polietileno da Eastman EE-2 é uma poliolefina funcionalmente modificada, desenvolvida para modificação do asfalto a ser aplicado a quente (Leite, 1999).

O polímero TR 2040 da Petroflex tem menor massa molar – MM, maior teor de estireno e maior polidispersão que o TR1101 da Shell. A moagem dos TR1101 Shell ou TRD 101 Petroflex conduz a copolímeros de menor massa molar. O polímero SBS moído contém sílica para evitar reaglomeração. O polímero SBS estrelado TR1186 Shell apresenta MM duas vezes maior que o TR1101.

Leite (1999) estudou quatro tipos de SBR, todos com 24% de estireno, da linha Butonal fornecidos pela Basf para preparo de asfaltos modificados. Dois deles são aniônicos, NS175 e NX1127, com 70 a 72% de sólidos e os outros dois são catiônicos, NS198 e NX1118, com 63 a 65% de sólidos. O polímero SBR não exige agitadores de alto cisalhamento para sua modificação, mas requer seleção da composição do CAP para alcance de compatibilidade.

O copolímero randômico SBR, por se apresentar sob forma de látex, é de fácil dispersão no CAP. Sua massa molar alta acarreta aumento de viscosidade, limitando seu emprego em 3%, o que influencia as propriedades mecânicas, sendo nesse caso inferiores às do SBS. A Basf produz vários tipos de SBR de mesmo teor de estireno com propriedades distintas oriundos de diferentes massas molares que resultam em misturas compatíveis com CAPs de diferentes procedências.

Existem numerosos polímeros atualmente disponíveis no mercado, inclusive muitos deles com nomes comerciais, tais como Kraton, Europrene, Coperflex, Cariflex etc., todos à base de polímero SBS.

A Figura 2.25 mostra uma representação esquemática do polímero EVA. Quanto

maior o teor de acetato, maior o caráter amorfo e as propriedades se aproximam às de um elastômero. Quanto menor o teor de acetato, maior a cristalinidade e, portanto, o comportamento plastomérico. O EVA se solubiliza em frações saturadas devido à sua natureza alifática que provém de seqüências etilênicas de alto peso molecular.

Leite (1999) apresenta pesquisas sobre asfaltos polímeros inclusive considerando polímeros menos usuais em pavimentação. Desenvolveu formulações e condições operacionais de preparo de asfaltos modificados com diferentes polímeros a partir de petróleos brasileiros. Implementou ensaios para a caracterização reológica dos asfaltos modificados, usou compatibilizantes para misturas de CAP com SBS para melhoria da resistência ao envelhecimento e apresentou formulações estocáveis de asfalto com borraça de pneu.

Os asfaltos modificados por SBS, a partir de petróleos brasileiros, mostraram-se compatíveis empregando cimentos asfálticos de baixa penetração (inferior a 30 décimos de milímetro) com diluentes aromáticos convencionais, sendo que o uso de diluente altamente aromático possibilitou a compatibilização de qualquer tipo de CAP de petróleo brasileiro com SBS. O uso de diluentes de óleo de xisto no preparo de asfaltos modificados por SBS propiciou a redução da viscosidade a 135°C do produto final.

Os asfaltos modificados por SBS apresentaram menor resistência ao envelhecimento, em virtude da degradação térmica do SBS, com perda de elasticidade, que os asfaltos modificados por EVA. A melhoria da resistência ao envelhecimento pode ser obtida por otimização do processo de preparação, por ajuste na formulação quanto à aromaticidade, mediante reticulação com enxofre e/ou uso de SBS em grãos e misturadores de alto cisalhamento. Asfaltos modificados por EVA com 28% de acetato de vinila apresentaram elasticidade inferior aos modificados por SBS, mas superior aos demais asfaltos plastoméricos. A resistência à deformação permanente dos asfaltos modificados por EVA foi maior que a dos asfaltos modificados por SBS, enquanto a resistência à fadiga foi inferior, porém como as temperaturas no Brasil são mais altas que na Europa e nos EUA, o resultado do asfalto modificado por EVA é aceitável (Leite, 1999).

O conceito de compatibilidade está associado com a estabilidade à estocagem por dois conceitos:

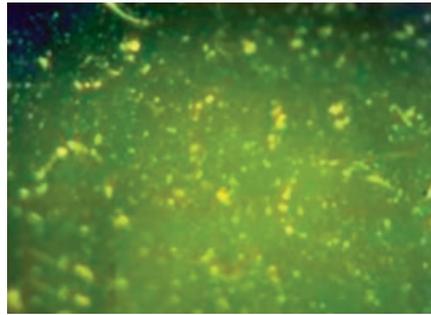
- *compatível* – inexistente a separação de fases, sem precauções com manuseio, estocagem sem agitação;
- *semicompatível* – a separação de fases pode ocorrer. A separação lenta pode ser evitada através de estocagem com agitação, e a separação rápida de fases irá requerer agitação intensa mesmo em transporte por curto espaço de tempo.

Pode ser analisada a interação entre as fases asfalto-polímero através de microscópio óptico de fluorescência, podendo ser visualizadas várias fases, conforme mostrado na Figura 2.26. Também é possível distinguir o tipo de polímero incorporado com o uso de ampliações maiores.

O mecanismo de modificação do asfalto por SBS passa pelo inchamento e posterior



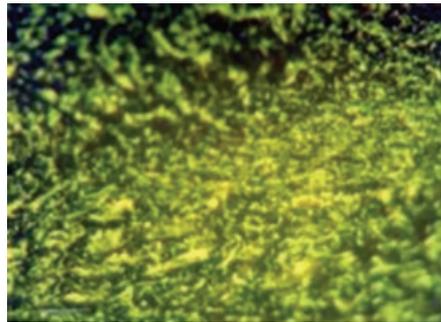
(a) Microscópio óptico de fluorescência



(b) Matriz asfáltica



(c) Matriz polimérica



(d) Inversão de matrizes

Figura 2.26 Equipamento de análise da interação asfalto-polímero e fases do processo de incorporação

formação de duas fases na escala micro: asfaltenos em maltenos e SBS em maltenos. Há também mistura física por atração molecular. A micromorfologia compatível é sensível a tratamentos térmicos. A inversão da matriz asfáltica em polimérica (Figura 2.26), desejável para as propriedades requeridas na pavimentação, ocorre em teores de 4 a 6% de SBS, que coincidem com a faixa usual de utilização e com a variação drástica de propriedades, por exemplo, o ponto de amolecimento. Há recomendação de adição de mais 1% de SBS para garantia de qualidade. A seleção de CAP que acarrete compatibilidade é questão econômica (preço do CAP + custo de ajustes de polímero *versus* custos de tanques com agitação). Solubilidade em demasia nem sempre reflete melhores propriedades (Leite, 1999).

Os asfaltos modificados por EVA são fluidos pseudoplásticos acima de 100°C. O uso de derivados de xisto na formulação de asfaltos modificados reduz a viscosidade a altas temperaturas facilitando as operações de usinagem e compactação. Apesar de ser considerado um plastômero, a região amorfa do EVA HM 728 confere elasticidade às misturas, permitindo o alcance de valores de retorno elástico de até 60%, ensaio descrito sucintamente a seguir no item 2.4.2. Ligantes com 5% de EVA apresentam algumas características a temperaturas de 25°C bem próximas às de ligantes com 3% de SBS.

O polímero EVA é de fácil incorporação e não requer alto cisalhamento. Apresenta boa resistência ao envelhecimento, semelhante à do CAP (Leite, 1999).

2.4.2 Especificações brasileiras de asfalto modificado por polímeros

Como é difícil acompanhar quimicamente a incorporação do polímero ao asfalto, em muitos países as especificações baseiam-se nas alterações das características físicas e mecânicas do asfalto modificado, com base nos ensaios já descritos no item 2.2.5 procedidos da mesma forma ou com pequenas alterações para ressaltar a presença do polímero. Com o desenvolvimento de alguns outros ensaios físicos específicos complementares, foram montadas as principais especificações de asfalto modificado por polímero (AMP) no mundo.

Leite (1999) faz um balanço de mais de uma dezena de especificações de vários países, e ressalta que em muitos existem especificações particulares para cada tipo de polímero empregado. Em geral, elas se baseiam em medidas de tensão *versus* deformação, viscosidade *versus* temperatura, efeito do calor e do ar, estabilidade à estocagem, recuperação elástica, suscetibilidade térmica e módulo de rigidez.

O DNER (atual DNIT) propôs uma especificação para asfalto modificado com SBS que está mostrada na Tabela 2.7 (Pinto *et al.*, 1998; DNER, 1999).

TABELA 2.7 ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA PARA ASFALTO MODIFICADO COM POLÍMERO (AMP) (DNER – EM 396/99)

Característica	Exigência	
	Mínima	Máxima
Penetração, 100g, 5s, 0,1mm	45	-
Ponto de fulgor, °C	235	-
Dutilidade, 25°C, 5cm/min, cm	100	-
Densidade relativa 25°C/4°C	1,00	1,05
Ponto de amolecimento, °C	60	85
Ponto de ruptura Fraass, °C	-	-13
Recuperação elástica, 20cm, 25°C, %	85	-
Viscosidade cinemática, 135°C, cSt	850	
Estabilidade ao armazenamento, 500ml em estufa a 163°C por 5 dias:		
• diferença de ponto de amolecimento, °C	-	4
• diferença de recuperação elástica, 20cm, 25°C, %	-	3
Efeito do calor e do ar (ECA)		
• variação em massa, %	-	1,0
• porcentagem da penetração original	50	-
• variação do ponto de amolecimento, °C	-	4
• recuperação elástica, %	80	-

O Instituto Brasileiro do Petróleo e Gás (IBP), através de sua Comissão de Asfalto, também propôs uma especificação de asfalto modificado por polímero que foi aprovada pela Agência Nacional de Petróleo (ANP) conforme Resolução 31/2007. Essa proposta está mostrada na Tabela 2.8.

Os ensaios referidos nas Tabelas 2.7 e 2.8, que são diferentes daqueles já citados no item 2.2.5, são descritos em linhas gerais a seguir.

TABELA 2.8 ESPECIFICAÇÃO DE ASFALTO-POLÍMERO (SBS) (ANP, 2007)

Tipo					
Grau (Ponto de amolecimento mín./ Recuperação elástica a 25°C mín.) (°C/%)	Método ABNT	50/65	55/75	60/85	65/90
Ensaio na amostra virgem					
Penetração 25°C, 5s, 100g, 0,1mm	NBR 6576	45-70	45-70	40-70	40-70
Ponto de amolecimento, mín., °C	NBR 6560	50	55	60	65
Viscosidade Brookfield a 135°C, <i>spindle</i> 21, 20 RPM, máx., cP	NBR 15184	1.500	3.000	3.000	3.000
Viscosidade Brookfield a 150°C, <i>spindle</i> 21, 50 RPM, máx., cP	NBR 15184	1.000	2.000	2.000	2.000
Viscosidade Brookfield a 177°C, <i>spindle</i> 21, 100 RPM, máx., cP	NBR 15184	500	1.000	1.000	1.000
Ponto de fulgor, mín., °C	NBR 11341	235	235	235	235
Ensaio de separação de fase, máx., °C	NBR 15166	5	5	5	5
Recuperação elástica a 25°C, 20cm, mín., %	NBR 15086	65	75	85	90
Recuperação elástica a 4°C, 10cm, %	NBR 15086	anotar	anotar	anotar	anotar
Ensaio no resíduo após RTFOT					
Varição de massa, máx., %	NBR 15235	1	1	1	1
Aumento do ponto de amolecimento, °C, máx.	NBR 6560	6	7	7	7
Redução do ponto de amolecimento, °C, máx.	NBR 6560	3	5	5	5
Porcentagem de penetração original, mín.	NBR 6576	60	60	60	60
Porcentagem de recuperação elástica original a 25°C, mín.	NBR 15086	80	80	80	80

2.4.3 Ensaio correntes

Recuperação elástica ou retorno elástico

A recuperação elástica é um ensaio que utiliza o dutilômetro com molde modificado; o teste é realizado a 25°C ou a 4°C; a velocidade de estiramento é de 5cm/min para distinguir bem materiais modificados com elastômeros dos demais. Interrompe-se o ensaio após atingir-se 200mm de estiramento e secciona-se o fio de ligante, em seu ponto médio, observando-se ao final de 60 minutos quanto houve de retorno das partes

ao tamanho original, ou seja, após junção das extremidades seccionadas, mede-se novamente o comprimento atingido. Este valor é comparado com o especificado. As normas deste ensaio são ASTM D 6084 e ABNT NBR 14756/2004.

Na Figura 2.27 estão apresentadas fotos que ilustram o ensaio e a diferença de comportamento de um ligante modificado por polímero e um convencional. Esse ensaio mostra claramente o efeito do aumento do teor de elastômero no asfalto, porém é pouco sensível aos efeitos dos plastômeros; não depende linearmente do teor do polímero e sim da interação do polímero com o asfalto, nem apresenta relação linear com ponto de amolecimento. Porém, não se relaciona facilmente com desempenho em campo (Leite, 1999).

Existe ainda um outro tipo de ensaio que pode ser feito usando um dutilômetro acoplado a um transdutor de força que vem sendo chamado de força-dutilidade (*force-ductility*) que determina a força necessária para estiramento do ligante até a ruptura, sob taxa de alongamento constante. Esse tipo de ensaio é usado em algumas especificações internacionais.



(a) Equipamento com ensaio em andamento e detalhe do molde



(b) Progressão do ensaio com alongamento do ligante asfáltico



(c) Ruptura do ligante asfáltico

Figura 2.27 Ensaio de recuperação elástica mostrando em (a) o início do alongamento; (b) ductilidade em amostra de asfalto sem modificação (ao fundo) e modificado por polímero (na frente) e (c) o mesmo ensaio de (b) após ruptura

Ensaio de separação de fases ou estabilidade à estocagem

Uma técnica recente para avaliar a compatibilidade de asfaltos modificados por polímero consiste da combinação das técnicas de polarização cruzada (CP) e rotação segundo ângulo mágico (MAS) que constitui a técnica básica de ressonância nuclear magnética – RNM (NMR em inglês). A RNM no estado sólido permite o estudo de mobilidade molecular e homogeneidade de asfaltos modificados. O estudo da estrutura de asfaltos modificados através das constantes de tempo de relaxação do spin hidrogênio ($T_{1\rho H}$), determinadas pela taxa de difusão de spin através das amostras de asfaltos modificados, mostra que a técnica de RNM pode ser usada para medida de compatibilidade e mobilidade moleculares (Leite, 1999).

O ensaio de separação de fases (ABNT NBR 15166/2004) é empregado para quantificar a estabilidade à estocagem e correlaciona-se muito bem com observações em microscopia óptica por fluorescência e também com resultados de tempo de relaxação do spin hidrogênio por ressonância nuclear magnética (RNM). Consiste em se colocar o asfalto-polímero em um tubo metálico padronizado, na vertical, em repouso, durante 5 dias dentro de uma estufa a 163°C e ao final desse período colher uma amostra em dois pontos distintos: um no topo e outro no fundo do tubo. Nessas amostras são realizados os ensaios de ponto de amolecimento e de recuperação elástica. As diferenças entre os resultados das amostras do topo e da base não podem ser maiores do que os limites máximos especificados na Tabela 2.7, para que a mistura asfalto-polímero testada seja considerada estocável. Na Figura 2.28 são mostrados os tubos metálicos padronizados do ensaio de compatibilidade, colocados dentro da estufa e um esquema desse ensaio.

Coesividade Vialit

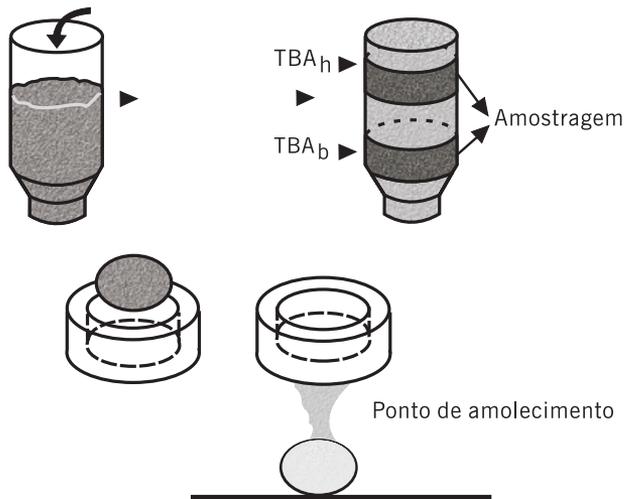
Esse ensaio mede a característica de coesão proporcionada pelo asfalto-polímero por meio de um pêndulo que solicita uma amostra do material a ser testado. Esse método consiste em depositar uma fina camada do ligante a ser testado entre dois cubos que possuem, em uma de suas faces, uma área “dentada”. Faz-se a medição da energia necessária para descolar os dois cubos. Esse método está padronizado na França como TT 66-037.

A Figura 2.29 mostra uma foto do equipamento e um exemplo de resultado para asfaltos convencional e modificado por polímero. A coesão Vialit consiste na medida da energia necessária para promover a ruptura de uma película de ligante colocada dentro do equipamento e solicitada por impacto pela passagem de um pêndulo. Esse ensaio originalmente era associado ao emprego em tratamentos superficiais, porém, também pode servir para comparações entre tipos de ligantes. A coesão varia com a temperatura do ensaio como mostrado na Figura 2.29. A presença do polímero em geral aumenta a coesão do ligante. O ensaio de coesividade estima o grau de adesão entre um agregado e um ligante quando sujeitos a um impacto repentino.



(a) Estufa com recipientes

(Foto: IPT, SP)



(b) Esquema de amostragem e realização de ensaio após 5 dias em estufa

Figura 2.28 Ensaio de separação de fases ou estabilidade ao armazenamento de asfalto-polímero (a) recipientes padrões colocados dentro da estufa e (b) desenho esquemático da amostragem de ligante armazenado dentro do recipiente e ensaio

Ensaio de *toughness* & *tenacity* (fragilidade & tenacidade)

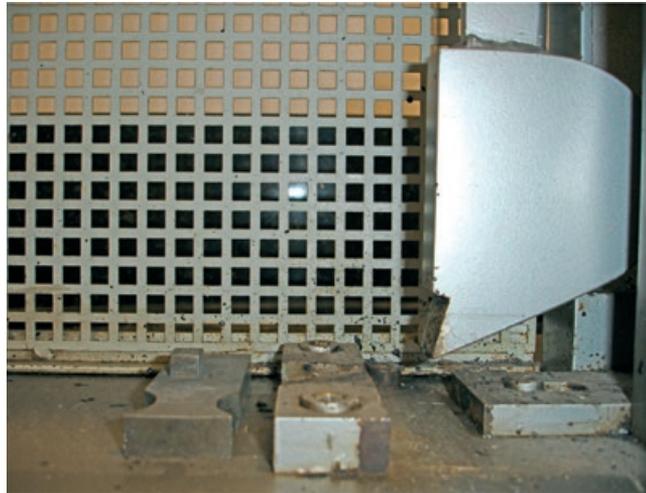
Toughness é a medida do trabalho total para tracionar uma amostra de ligante numa prensa de laboratório e *tenacity* é o trabalho requerido para alongar a amostra depois que a resistência inicial foi superada (ASTM D 5801).

O ensaio chamado *toughness* & *tenacity*, sem tradução oficial no país, tentativamente denominado por fragilidade & tenacidade, é realizado à temperatura ambiente com velocidade de 500mm/min e consiste em medir a força necessária para tracionar um cabeçote hemisférico imerso dentro de uma amostra do ligante. A fragilidade é definida

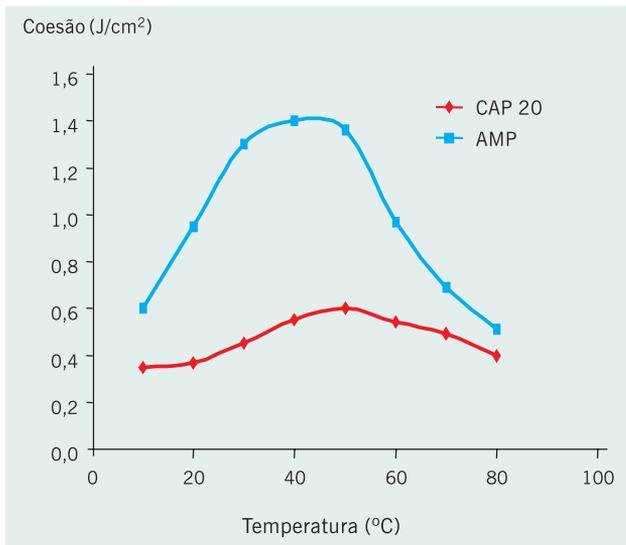


(a) Equipamento fechado

(Fotos: Cenpes, Petrobras)



(b) Equipamento aberto



(c) Exemplo de resultado de ensaio

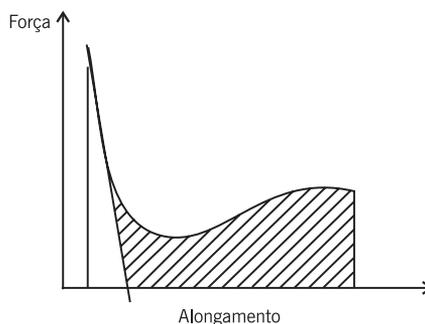
Figura 2.29 Equipamento de ensaio de coesão Vialit e exemplo de resultado (Leite, 2003)

como o trabalho total para tracionar até o rompimento um corpo-de-prova de ligante, representada pela área total sob a curva resultante do ensaio e a tenacidade é definida como o trabalho necessário para estirar o ligante após o ponto de escoamento (*yield point*) representado pela área hachurada na Figura 2.30. Vem sendo empregado desde 1988 em estudos de ligantes modificados com polímero e verificou-se, por exemplo, que quando se aumenta o teor de SBR no asfalto, essa propriedade aumenta. Esse ensaio faz parte das especificações ASTM de asfaltos modificados por SBR.

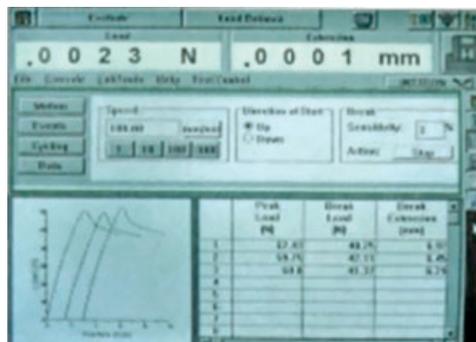
A Figura 2.30 mostra o equipamento de medida de tenacidade (ASTM D 5801) utilizado para qualificar asfaltos modificados por polímero, usando uma prensa de laboratório.



(a) Equipamento



(b) Exemplo de resultado de tenacidade



(c) Tela do programa do ensaio

Figura 2.30 Equipamento do ensaio de tenacidade, exemplo de resultados obtidos e tela do programa de controle do ensaio

(Fotos: Cenpes, Petrobras)

2.4.4 Asfalto-borracha

Uma forma alternativa de se incorporar os benefícios de um polímero ao ligante asfáltico, e ao mesmo tempo reduzir problemas ambientais, é utilizar a borracha de pneus inservíveis em misturas asfálticas. Os pneus inservíveis são problemas para a sociedade e sua utilização em pavimentação tem sido uma das técnicas mais utilizadas em todo o mundo porque se emprega grande volume desse resíduo com melhorias para as misturas asfálticas sob vários aspectos.

Um pneu de veículo de passeio típico (Goodyear P 195/ 75R14), com massa aproximada de 10kg, contém (Bertollo, 2002):

- 2,50kg de diferentes tipos de borracha sintética;
- 2,0kg de 8 diferentes tipos de borracha natural;
- 2,5kg de 8 tipos de negro-de-fumo;
- 0,75kg de aço para as cinturas;
- 0,50kg de poliéster e náilon;
- 0,25kg de arames de aço;
- 1,5kg de diferentes tipos de produtos químicos, óleos, pigmentos etc.

No Brasil, são colocados no mercado aproximadamente 61 milhões de pneus por ano, sendo que cerca de 38 milhões são resultado da produção nacional e 23 milhões são pneus reaproveitados, usados importados ou recauchutados (Anip, 2001).

São dois os métodos de incorporação da borracha triturada de pneus às misturas asfálticas: o processo úmido (*wet process*) e o processo seco (*dry process*).

No processo úmido, a borracha finamente triturada é adicionada ao CAP aquecido, produzindo ligante modificado, que tem sido denominado de asfalto-borracha (*asphalt rubber*, em inglês). O asfalto-borracha pode ser utilizado em serviços de pavimentação, a serem abordados no Capítulo 4, como: concreto asfáltico (CA), *Stone Matrix Asphalt* ou *Stone Mastic Asphalt* (SMA), Camada Porosa de Atrito (CPA), tratamentos superficiais (TS), selagem de trincas e de juntas. No processo úmido, o pó de pneus representa em geral 15 a 20% da massa de ligante ou menos que 1,5% da massa total da mistura.

A Figura 2.31 mostra um esquema do processo úmido e a Figura 2.32 mostra aspectos da consistência do asfalto-borracha no momento da usinagem, processo estocável (*terminal blending*).

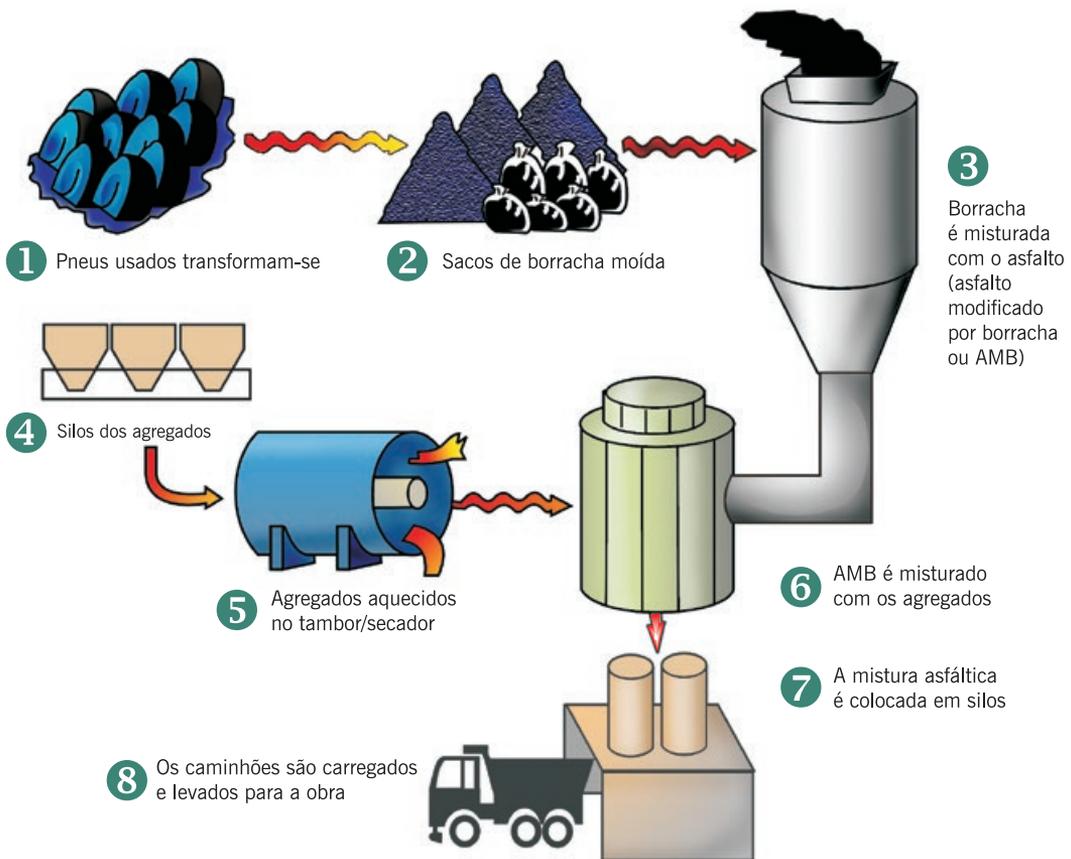


Figura 2.31 Esquema de fabricação do asfalto-borracha via úmida pelo processo de mistura estocável (*terminal blending*)

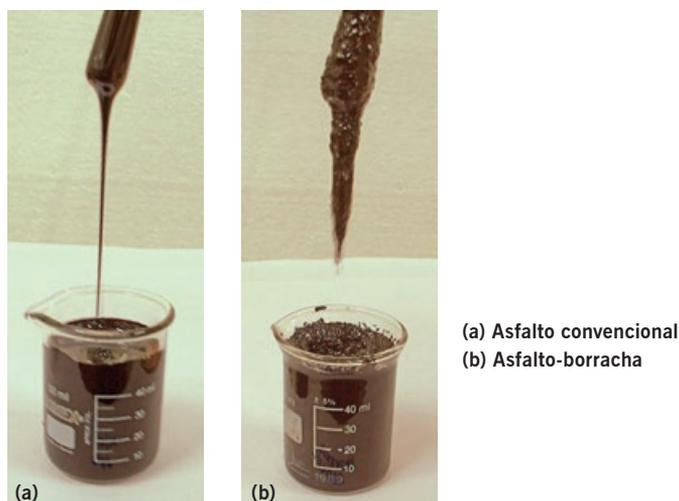


Figura 2.32 Exemplo de maior consistência do asfalto-borracha no momento da usinagem

De acordo com Bertollo *et al.* (2003) e Morilha (2004), o ligante modificado por borracha moída de pneus por via úmida, dependendo do seu processo de fabricação, pode ser estocável ou não-estocável. O sistema não-estocável é conhecido como *continuous blending* e é produzido com equipamento misturador na própria obra e, nessa condição, deve ser aplicado imediatamente devido à sua instabilidade e, assim, apresenta algumas características diferentes do asfalto-borracha estocável. O sistema estocável, conhecido como *terminal blending*, é preparado com borracha moída de pneus finíssima (partículas passantes na peneira nº 40) e devidamente misturado em um terminal especial, produzindo um ligante estável e relativamente homogêneo, posteriormente transportado para cada obra. Esse sistema, quando comparado com o sistema *continuous blending*, permite uma economia de tempo e de custos já que o ligante asfáltico modificado é produzido e transportado para várias obras ao mesmo tempo, enquanto no sistema *continuous blending* cada obra deve possuir um equipamento de fabricação de asfalto-borracha. Além disso, o controle de qualidade do asfalto-borracha fabricado em um terminal é mais acurado e confiável.

O asfalto-borracha estocável (*terminal blending*) deve ser processado em altas temperaturas por agitação em alto cisalhamento. Obtém-se assim a despolimerização e a desvulcanização da borracha de pneu permitindo a reação da borracha desvulcanizada e despolimerizada com moléculas do CAP, o que resulta em menor viscosidade do produto final.

Há também o processo de mistura via úmida imediatamente antes da usinagem em equipamentos especiais, que são acoplados às usinas de concreto asfáltico, e só se adiciona a borracha moída ao CAP minutos antes de ele ser incorporado ao agregado. A Figura 2.33 mostra um exemplo desse tipo de equipamento, do estado do Arizona nos Estados Unidos.

O asfalto-borracha obtido pelo processo imediato, chamado de não-estocável ou *just-in-time*, conduz a um inchamento superficial da borracha nos maltenos do CAP o que permite o uso de borracha com maior tamanho de partícula e aumento da viscosidade.



Figura 2.33 Exemplo de usina móvel de preparação de asfalto-borracha do estado do Arizona, Estados Unidos

(Foto: Leite, 2003)

Não ocorre despolimerização nem desvulcanização e a agitação é feita em baixo cisalhamento.

No processo seco, a borracha triturada entra como parte do agregado pétreo da mistura e juntamente com o ligante asfáltico dá origem ao produto “agregado-borracha” ou concreto asfáltico modificado com adição de borracha (RUMAC – *rubber modified asphalt concrete*). A mistura modificada com adição de borracha via seca só deve ser utilizada em misturas asfálticas a quente (concreto asfáltico convencional ou com granulometria especial descontínua – *gap-graded*, por exemplo), não devendo ser usada em misturas a frio (Specht, 2004; Patriota, 2004; Pinheiro, 2004).

Em 2005 o Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná – DER/PR – editou a especificação de serviço DER/PR ES – P 28/05 destinada a regulamentar o emprego de asfalto-borracha em obras de pavimentação com misturas a quente. As principais características dessa especificação quanto ao ligante asfáltico modificado por borracha de pneumáticos estão na Tabela 2.9 além das seguintes condições:

- a) o teor mínimo de borracha deve ser de 15% em peso, incorporado no ligante asfáltico (via úmida);
- b) o tempo máximo e as condições de armazenamento e estocagem do asfalto-borracha, para diferentes situações, devem ser definidos pelo fabricante;
- c) a garantia do produto asfáltico por carga deve ser atestada pelo fabricante por meio de certificado com as características do produto;
- d) para utilização do asfalto-borracha estocado, deve-se verificar, previamente, se os resultados dos ensaios cumprem os limites da especificação.

Na Tabela 2.9 estão indicados os requisitos para o asfalto – borracha estocável, conforme a Resolução ANP Nº 39, de 24.12.2008 - DOU 26.12.2008. Na Figura 2.34 apresenta-se um equipamento para a medida da recuperação elástica por torção, empregado em algumas especificações estrangeiras. No Brasil, a especificação emprega o dutilômetro (ABNT NBR 15086).

TABELA 2.9 ESPECIFICAÇÕES DOS CIMENTOS ASFÁLTICOS DE PETRÓLEO MODIFICADOS POR BORRACHA MOÍDA DE PNEUS - ASFALTOS BORRACHA – ANP 2008)

Característica	Unidade	Limite		Método	
		AB8	AB22	ABNT/NBR	ASTM
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1 mm	30 – 70		6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	50	55	6560	D 36
Viscosidade Brookfield a 175°C, spindle 3, 20 rpm, máx.	cP	800-2000	2200-4000	15529	D 2196
Ponto de fulgor, mín.	°C	235		11341	D 92
Estabilidade à Estocagem, máx.	°C	9		15166	D 7173
Recuperação Elástica a 25° C, 10 cm, mín.	%	50	55	15086	D 6084
Varição em massa do RTFOT, máx.	% massa	1,0		15235	D 2872
Ensaio no Resíduo RTFOT					
Varição do ponto de amolecimento, máx.	°C	10		6560	D 36
Porcentagem de Penetração original, mín.	%	55		6576	D 5
Porcentagem de Recuperação Elástica Original (25°C, 10 cm) mín.	%	100		15086	D 6084

Outro ensaio que vem sendo utilizado para avaliar o retorno elástico de ligantes modificados é o chamado ensaio de resiliência (Figura 2.35) ASTM D 5329, que mede a capacidade de um cimento asfáltico retornar ao seu estado original depois de ser submetido à compressão. O ensaio consiste em encher uma cuba padronizada com o ligante aquecido até se tornar fluido para poder ser vertido na cuba e, após o resfriamento do material, levá-lo a um banho de água a 25°C. A seguir, submeter a amostra colocada em um penetrômetro a uma pressão de uma esfera de aço padronizada, sob carga estabelecida de 75g, por 5 segundos e medir o quanto ela penetra na amostra (P). Sem retornar o êmbolo para o zero e mantendo a esfera em contato com o ligante asfáltico, pressionar o êmbolo de forma que se aumente em 100 unidades a medição inicial (P + 100) em



Figura 2.34 Equipamento para ensaio de recuperação elástica por torção



(a) Equipamento

(Foto: Cenpes, Petrobras)



(b) Detalhe da cuba e da esfera

(Foto: Rubbioli, 2005)

Figura 2.35 Exemplo de equipamento para ensaio de resiliência de ligantes asfálticos

um período de 10 segundos. Manter o êmbolo na posição $P + 100$ por 5 segundos, retornando-o ao zero após este tempo. Deixar a amostra descansar por 20 segundos e medir a recuperação do ligante (F). Registrar as médias de três determinações e referir como resiliência do ligante o valor obtido, pela expressão recuperação elástica pela resiliência (%) = $P + 100 - F$.

No Brasil a primeira aplicação de concreto asfáltico com asfalto-borracha foi feita em agosto de 2001 na Rodovia BR-116/RS. Atualmente, já está sendo comercializado em grande escala o asfalto-borracha, e já foi empregado com sucesso em algumas obras de recuperação estrutural de trechos rodoviários (Ruwert *et al.*, 2001; Leite *et al.*, 2003; Morilha *et al.*, 2003; Specht, 2004; Pinheiro e Soares, 2004). Já se tem experiência em concreto asfáltico e tratamento superficial. Também em alguns trechos já foram aplicados com o processo seco (agregado-borracha).

2.5 EMULSÃO ASFÁLTICA

Para que o CAP possa recobrir convenientemente os agregados é necessário que apresente uma viscosidade em torno de 0,2Pa.s, o que só será atingido por aquecimento do ligante e do agregado a temperaturas convenientemente escolhidas para cada tipo de ligante. Para evitar o aquecimento do CAP a fim de obter viscosidades de trabalho nos serviços de pavimentação, é possível promover mudanças no ligante utilizando-se dois processos de preparação:

- adição de um diluente volátil ao asfalto produzindo o que se convencionou chamar no Brasil de asfalto diluído (*cutback* em inglês) – ADP;
- emulsão do asfalto.

Uma emulsão é definida como uma dispersão estável de dois ou mais líquidos imiscíveis. No caso da emulsão asfáltica (EAP) os dois líquidos são o asfalto e a água.

A emulsão asfáltica representa uma classe particular de emulsão óleo-água na qual a fase “óleo” tem uma viscosidade elevada e os dois materiais não formam uma emulsão por simples mistura dos dois componentes, sendo necessária a utilização de um produto auxiliar para manter a emulsão estável. Além disso, o asfalto precisa ser preparado por ação mecânica que o transforme em pequenas partículas ou glóbulos (IBP, 1999; Hunter, 2000; Abeda, 2001; Shell, 2003).

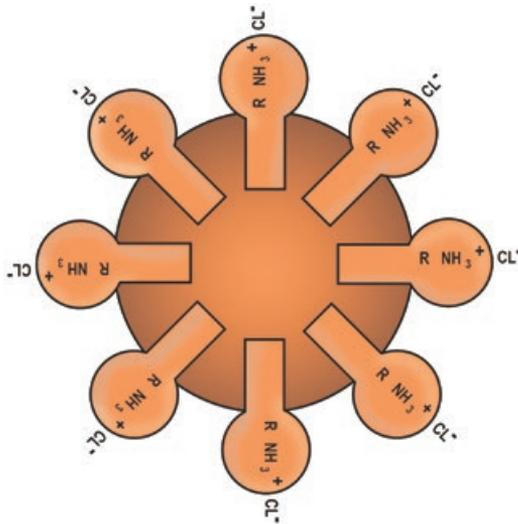
O produto especial chamado de agente emulsionante ou emulsificante é uma substância que reduz a tensão superficial, o que permite que os glóbulos de asfalto permaneçam em suspensão na água por algum tempo, evitando a aproximação entre as partículas e sua posterior coalescência (junção de partes que se encontravam separadas). A proporção típica entre óleo e água é de 60 para 40%. O tempo de permanência da separação entre os glóbulos de asfalto pode ser de semanas até meses, dependendo da formulação da emulsão.

2.5.1 Esquema de produção

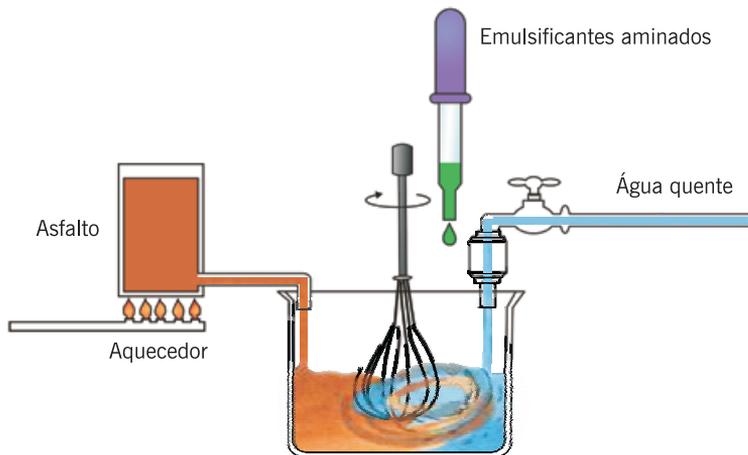
A ação mecânica de obtenção dos glóbulos é feita em um moinho coloidal especialmente preparado para a “quebra” do asfalto aquecido em porções minúsculas que devem ter um tamanho especificado que é micrométrico. O tamanho dos glóbulos depende do moinho empregado e da viscosidade do asfalto original, normalmente variando entre 1 e 20 μ m. Um exemplo desse tipo de moinho pode ser visto na Figura 2.36.

As emulsões podem apresentar carga de partícula negativa ou positiva, sendo conhecidas, respectivamente, como aniônica ou catiônica.

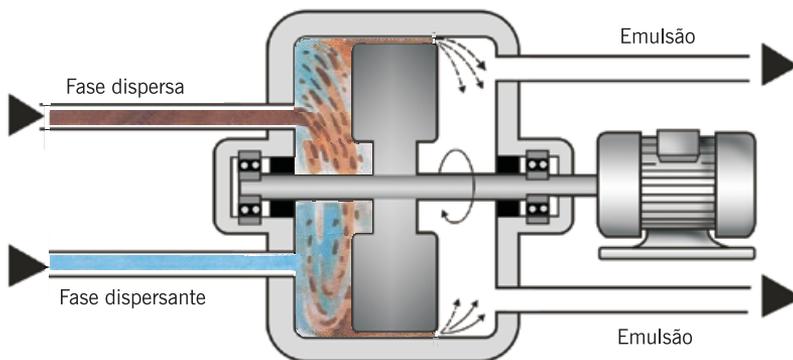
A EAP é produzida por dispersão dos glóbulos de asfalto que saem do moinho e caem em uma solução de água já misturada com o agente emulsificante e com outros aditivos e adições particulares para obter efeitos diferenciados, tanto em relação ao tempo de separação das fases quanto ao uso final que se pretende para aquela emulsão específica. A Figura 2.37 mostra algumas fotos desse processo em uma usina.



(a) Esquema representativo de uma emulsão asfáltica catiônica



(b) Esquema do processo industrial de fabricação de emulsão asfáltica – fase aquosa acidificada com emulsificantes aminados



(c) Representação esquemática de um moinho coloidal de preparação dos glóbulos de asfalto para fabricação de emulsão

Figura 2.36 Processo de fabricação de emulsões asfálticas (LCPC, 1976)



Figura 2.37 Exemplos de várias instalações de uma fábrica de emulsão

2.5.2 Especificação brasileira

A Tabela 2.10 mostra as especificações das emulsões asfálticas para pavimentação. As designações das classes das emulsões brasileiras são feitas em função (i) do tempo necessário para que ocorra a ruptura, dividida em lenta, média ou rápida; (ii) do teor de asfalto contido na mesma; e (iii) da carga iônica. Por exemplo, uma emulsão designada de RR 1C representa uma emulsão de ruptura rápida RR, catiônica C, e o número 1 indica a faixa de viscosidade. Essa especificação também se encontra na ABNT NBR 14594/2000.

TABELA 2.10 ESPECIFICAÇÃO BRASILEIRA DE EMULSÕES ASFÁLTICAS CATIÔNICAS (Conselho Nacional de Petróleo – CNP, 07/88)

Característica	Métodos		Tipo de Ruptura				
	ABNT	ASTM	Rápida		Média		Lenta
			RR-1C	RR-2C	RM-1C	RM-2C	RL-1C
Ensaio sobre a emulsão							
Viscosidade Saybolt-Furol, s, 50°C	NBR 14491	D 88	20-90	100-400	20-200	100-400	Máx. 70
Sedimentação, % em peso máx.	NBR 6570	D 244	5	5	5	5	5
Peneiração, 0,84mm, % em peso máx.	NBR 14393	D 244	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Resistência à água, % mín. de cobertura	NBR 6300	D 244					
agregado seco			80	80	60	60	60
agregado úmido			80	80	80	80	80
Mistura com cimento, % máx. ou mistura com fíler silícico	NBR 6297 NBR 6302	D 244	–	–	–	–	2
			–	–	–	–	1,2 a 2,0
Carga da partícula	NBR 6567	D 244	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva
pH, máx.	NBR 6299	D 244	–	–	–	–	6,5
Destilação							
solvente destilado, % em vol.	NBR 6568	D 244	0-3	0-3	0-12	3-13	nula
resíduo, % em peso mín.			62	67	62	65	60
Desemulsibilidade							
% em peso mín.	NBR 6568	D 244	50	50	–	–	–
% em peso máx.			–	–	50	50	–
Ensaio sobre o solvente destilado							
Destilação, 95% evaporados, °C, máx.	NBR 9619	–	–	–	360	360	–
Ensaio sobre o resíduo							
Penetração, 25°C, 100g, 5s, 0,1mm	NBR 6576	D 5	50-250	50-250	50-250	50-250	50-250
Teor de betume, % em peso mín.	NBR 14855	D 2042	97	97	97	97	97
Dutilidade a 25°C, cm, mín.	NBR 6293	D 113	40	40	40	40	40

Os emulsificantes geralmente têm dois componentes com afinidades diferentes com a água e com o óleo, que serão responsáveis pela carga elétrica final que a EAP vai apresentar. Um dos ensaios de qualificação da emulsão é a medida dessa carga elétrica que terá importância fundamental no desempenho do produto nos usos em pavimentação. Por exemplo, agentes emulsificantes do tipo sulfato de sódio produzem emulsões aniônicas (carga negativa) e emulsificantes tipo amina produzem emulsões catiônicas (positivas). As emulsões catiônicas são as de maior uso atualmente pelo seu melhor desempenho nos serviços de pavimentação (Hunter, 2000; Abeda, 2001). É possível também produzir emulsões sem carga elétrica que são designadas de não-iônicas.

A forma de uso da emulsão consiste em provocar a ruptura ou quebra do equilíbrio frágil da mistura óleo-água, deixando os glóbulos livres para se reunirem, resultando na reconstituição do asfalto residual, que tanto quanto possível deve ser igual ao original antes da emulsificação.

A Tabela 2.11 mostra a especificação brasileira vigente de emulsões para aplicações em lama asfáltica, que é uma mistura de emulsão e agregado miúdo feita em equipamento especial e usada para recuperação funcional de pavimentos, como será visto em outros capítulos. Vale comentar que, apesar da especificação conter dois tipos de emulsões aniônicas, elas não são mais utilizadas atualmente.

Nas especificações, os ensaios ABNT listados apareciam com a referência da época da regulamentação em termos de numeração. Alguns desses ensaios já foram revistos desde a época da especificação e foram modificados nas Tabelas 2.10 e 2.11, e listados nas referências de acordo com sua mais recente edição. Os ensaios específicos de classificação das emulsões são descritos de forma básica, a seguir.

TABELA 2.11 ESPECIFICAÇÃO DE EMULSÕES ASFÁLTICAS PARA LAMA ASFÁLTICA (CNP – 17/73)

Característica	Métodos		Tipo				
	ABNT	ASTM	Aniônica		Catiônica		Especial
			LA-1	LA-2	LA-1C	LA-2C	LA-E
Ensaio sobre a emulsão							
Viscosidade Saybolt-Furol, s, 50°C, máx.	NBR 14491	D 88	100	100	100	100	100
Sedimentação, 5 dias, por diferença, % máx.	NBR 6570	D 244	5	5	5	5	5
Peneiração 0,84mm, % máx. retida	NBR 14393	D 244	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Mistura com cimento, % máx.	NBR 6297	D 244	2	–	2	–	2
Ou mistura com filler silícico, % máx.	NBR 6302		1,2-2,0	1,2-2,0	1,2-2,0	1,2-2,0	1,2-2,0
Carga da partícula	NBR 6302	D 244	negativa	negativa	positiva	positiva	–
Destilação							
Solvente destilado, % em vol. sobre o total da emulsão	NBR 6570	D 244	0	0	0	0	0
Resíduo, % em peso mín.			58	58	58	58	58
Ensaio sobre o resíduo							
Penetração, 25°C, 100g, 5s, 0,1mm	NBR 6576	D 5	50-150	50-150	50-150	50-150	50-150
Teor de betume, % em peso mín.	NBR 14855	D 2042	97	97	97	97	97
Dutilidade a 25°C, cm, mín.	NBR 6293	D 113	40	40	40	40	40

2.5.3 Ensaios básicos de emulsão

Ensaio de carga de partícula

O ensaio que determina a carga de partícula é realizado com auxílio de um equipamento de medida de pH (DNER – ME 002/98, ABNT NBR 6567/2000). Consiste em introduzir os eletrodos dentro da emulsão e verificar para qual deles as partículas são atraídas. A carga da partícula terá o sinal oposto ao do eletrodo para o qual foram atraídos os glóbulos de asfalto da emulsão – Figura 2.38.



Figura 2.38 Esquema do ensaio de carga de partícula de uma emulsão asfáltica

(Fotos: Greca Asfaltos)

Ruptura da emulsão

Quando a emulsão entra em contato com o agregado pétreo, inicia-se o processo de ruptura da emulsão que é a separação do CAP e da água, o que permite o recobrimento do agregado por uma película de asfalto. A água é liberada e evapora. A ruptura da emulsão consiste na anulação da camada de envolvimento dos glóbulos de asfalto dispersos na água, com a conseqüente união desses glóbulos (coagulação ou floculação). A velocidade de ruptura é função da composição química do agente emulsificante e da sua dosagem na emulsão.

O ensaio de ruptura da emulsão por mistura com cimento é descrito na norma NBR 6297/2003. Também é normalizado o ensaio de ruptura por mistura com fíler silício (NBR 6302/2000), que é parecido com o anterior utilizando-se outro produto para provocar a ruptura.

Ensaio de sedimentação

O ensaio de sedimentação (DNER 006/2000, ABNT NBR 6570/2000) consiste em deixar em repouso total por 5 dias 500ml de emulsão numa proveta (Figura 2.39), e após esse período retirar uma amostra de aproximadamente 55ml do topo da proveta e 55ml do fundo. Nessas amostras será medida a quantidade de resíduo presente após o repouso de 5 dias, colocando-se os béqueres contendo o material coletado durante 2 horas no interior da estufa à temperatura de $(163 \pm 3)^\circ\text{C}$. Após esse período remover cada béquer e agitar o resíduo vigorosamente. Recolocar os béqueres na estufa durante uma hora e então remover e deixar esfriar à temperatura ambiente. Por diferença de peso determina-se o resíduo.

Esse teste deve ser realizado em duas provetas e considerar a média dos resíduos como resultado. Realiza-se o teste de resíduo em ambas e calcula-se a diferença entre os valores encontrados no topo e na base. A diferença é o valor de sedimentação, que deve ser no máximo 5% em peso para todos os tipos de emulsão.



(a) Determinação do peso do equipamento de sedimentação da emulsão



(b) Carregamento do equipamento de sedimentação com a emulsão

Figura 2.39 Esquema do ensaio de determinação da sedimentação – DNER-ME 06/2000

(Fotos: Greca Asfaltos)

Ensaio de peneiração

A função desse ensaio é garantir a qualidade na fabricação da emulsão. O peneiramento ou peneiração (ABNT NBR 14393/1999) consiste em determinar a porcentagem em peso de partículas de asfalto retidas na peneira de malha nº 20 (0,84mm). Utiliza-se 1.000ml de emulsão, que é “peneirada” e em seguida pesada novamente para determinar a quantidade que ficou retida na peneira. É indesejável que a emulsão possua grumos, formando “pelotas” de CAP que ficam retidas na peneira (Figura 2.40). O limite de especificação para qualquer emulsão é de 0,1% de CAP (em peso) retido na peneira.

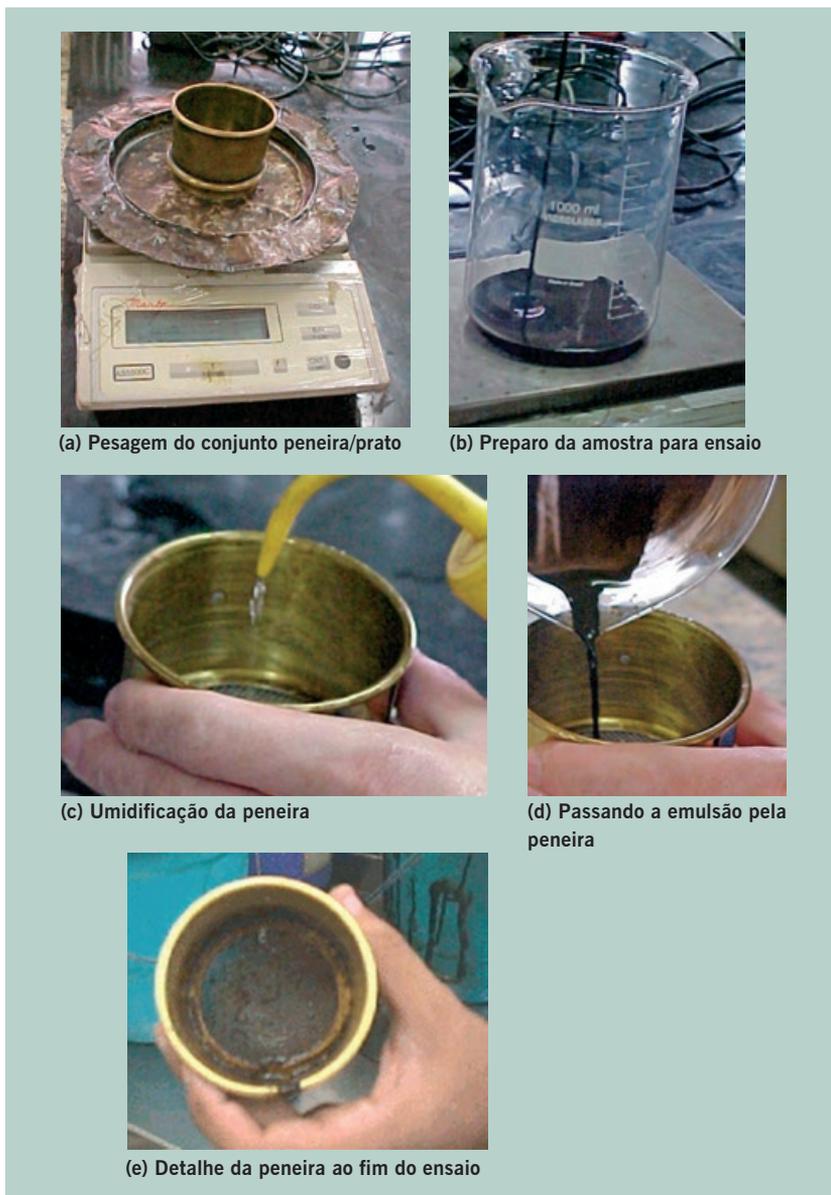


Figura 2.40 Determinação do peneiramento de emulsão asfáltica

(Fotos: Greca Asfaltos)

Ensaio de desemulsibilidade

O ensaio de desemulsibilidade é utilizado para determinar se uma quantidade conhecida de emulsão é parcial ou totalmente rompida pela adição de um reagente adequado, sendo o resultado expresso em porcentagem do teor do asfalto residual da emulsão. Pela norma ABNT NBR 6569, o reagente utilizado é o aerossol OT a 0,8%+ (dioctil sulfosucionato de sódio).

Para a realização do ensaio, é necessário previamente se determinar a porcentagem do resíduo por evaporação pela NBR 14376, obtendo-se o peso B. Esse ensaio será descrito a seguir.

O ensaio de desemulsibilidade é realizado da seguinte forma – Figura 2.41:

- coloca-se 100g de emulsão dentro de um béquer ou recipiente, e adiciona-se 35g do reagente à temperatura de 25°C; agita-se o conteúdo por 2 minutos com o auxílio de um bastão, comprimindo eventuais grumos formados contra as paredes do béquer. Verte-se a mistura sobre uma peneira com abertura de 1,40mm (0,725mm de diâmetro) e lava-se o béquer, o bastão e a peneira com água destilada;
- coloca-se o conjunto em estufa a 160°C deixando secar até constância de peso. Subtrai-se o peso dos acessórios utilizados (béquer, bastão e tela) do peso seco do conjunto, obtendo-se o resíduo de desemulsibilidade (A).

A desemulsibilidade é dada pela expressão:

$$\text{Desemulsibilidade (\%)} = \frac{A}{B} \times 100 \quad (2.12)$$

Onde:

A = resíduo de desemulsibilidade, em gramas (média de três ensaios);

B = resíduo por destilação, em gramas (ensaio descrito a seguir).



(a) Preparo do conjunto



(b) Adição da solução e realização da desemulsibilidade



(c) Detalhe da amostra rompida pela ação da solução

Figura 2.41 Determinação da desemulsibilidade de emulsões asfálticas

Ensaio de resíduo por evaporação

O ensaio de resíduo por evaporação (NBR 14376) tem por objetivo a determinação da quantidade de resíduo seco contido em uma emulsão asfáltica após aquecimento até a total evaporação da água, determinada por peso constante. A Figura 2.42 mostra os passos básicos desse ensaio.



Figura 2.42 Exemplos de passos do ensaio de determinação do resíduo por evaporação

Determinação do resíduo por destilação

A amostra é colocada em um destilador metálico especificado e aquecida por bico de Bunsen sob condições estabelecidas até 260°C, determinando-se ao final o resíduo da destilação (ABNT NBR 6568/2005). A Figura 2.43 mostra alguns aspectos deste ensaio. A amostra consiste de aproximadamente 300g da emulsão que serão passados em peneira de abertura de 841µm. O término da destilação deve ocorrer entre 45 e 75 minutos após atingida a temperatura de destilação que será mantida durante 15 minutos. O resíduo é expresso como a porcentagem de peso residual de material asfáltico emulsionado.



(a) Conjunto montado



(b) Detalhe do condensado da destilação da emulsão

Figura 2.43 Aspectos do ensaio de determinação do resíduo por destilação de emulsões asfálticas

(Fotos: Greca Asfaltos)

Viscosidade

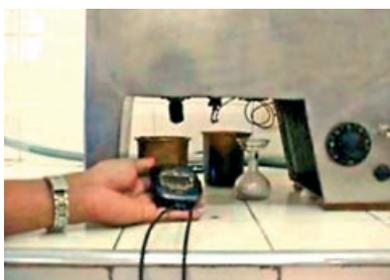
A viscosidade determina a trabalhabilidade da emulsão e é influenciada pela quantidade de asfalto presente, pelo emulsificante e pelo tamanho dos glóbulos. De acordo com a especificação brasileira de emulsão asfáltica, é medida por meio do viscosímetro Saybolt-Furol (ABNT NBR 14491). Na Figura 2.44 são mostrados os passos do ensaio. Alguns procedimentos de ensaio para emulsões diferem daqueles especificados para caracterização de CAP no mesmo equipamento.



(a) Colocando a emulsão no viscosímetro



(b) Iniciando o ensaio



(c) Controlando o tempo de escoamento



(d) Escoamento da emulsão

Figura 2.44 Etapas do ensaio de viscosidade Saybolt-Furol com emulsões

Determinação do pH da emulsão asfáltica

O ensaio de determinação do pH de uma emulsão asfáltica é descrito na norma ABNT NBR 6299/2005 e consiste em se usar um equipamento próprio mostrado na Figura 2.45. Esse aparelho possui um sensor que é mergulhado na amostra da emulsão e registra o pH, podendo-se com isto saber se a emulsão é básica ou ácida, o que está associado ao emulsificante empregado.



Figura 2.45 Determinação do pH da emulsão

Considerações sobre as emulsões

O balanço entre a estabilidade da emulsão e a velocidade da ruptura é crítico no seu desempenho e no sucesso dos serviços, devendo a emulsão apresentar estabilidade adequada para o transporte e estocagem, mas ao ser aplicada deve apresentar ruptura em tempo adequado ao tipo de serviço. A escolha do tipo de emulsão para cada serviço será comentada nos Capítulos 4 e 5.

A ruptura da emulsão é usualmente iniciada por adsorção entre a emulsão e os agregados. Em função do tipo de emulsão e do tipo do agregado, a ruptura passa a ser muito dependente das condições climáticas para acelerar a evaporação da água.

A Figura 2.46 mostra as fábricas de emulsões asfálticas existentes no país (Abeda, 2005).

Hoje estão disponíveis no mercado brasileiro também emulsões que utilizam asfalto modificado por polímero como base. Nas Tabelas 2.12 e 2.13 são mostradas as propostas de especificação brasileira para essas emulsões modificadas por SBR e SBS, respectivamente. As emulsões de cimentos asfálticos de petróleo modificadas por polímero SBR ou SBS são classificadas segundo a velocidade de ruptura nos tipos rápida, média, lenta e controlada.

Nessas tabelas aparecem alguns ensaios parecidos com os descritos para as emulsões sem polímero ou para o asfalto, porém eles apresentam certas especificidades de procedimento. Esses ensaios não serão descritos aqui, devendo o leitor consultar as respectivas normas brasileiras. Alguns desses ensaios são: recuperação elástica ABNT NBR 15086, resíduo seco por evaporação ABNT 14896 etc.

Região Norte

Tocantins

Centro-Oeste | Gurupi
Nacional | Palmas
Nacional | Araguatins
Greca Asfaltos | Palmas

Rondônia

Emam Asfaltos | Porto Velho

Amazonas

Ipiranga Asfaltos | Manaus
Emam Asfaltos | Manaus
Petrobras Distribuidora | Manaus

Pará

Petrobras Distribuidora | Belém

Região Nordeste

Bahia

Brasquímica | Candeias
Ipiranga Asfaltos | Feira de Santana
Petrobras Distribuidora | Camaçari
Petrobras Distribuidora | Salvador
Betunel | Candeias
Emam Asfaltos | Candeias
Greca Asfaltos | Madre de Deus
Nacional | Candeias
Viapol | Lauro de Freitas
Betumat | Candeias

Pernambuco

Brasquímica | C. Sto. Agostinho
Petrobras Distribuidora | Recife
Betumat | C. Sto. Agostinho

Maranhão

Petrobras Distribuidora | São Luiz

Ceará

Ipiranga Asfaltos | Maracanaú
Asfaltos Nordeste | Maracanaú
Greca Asfaltos | Maracanaú
Petrobras Distribuidora | Fortaleza
Betunel | Fortaleza
Brasquímica | Maracanaú
Emam Asfaltos | Pacatuba
Nacional | Fortaleza

Região Sul

Paraná

Greca Asfaltos | Araucária
Greca Asfaltos | Cascavel
Betunel | Apucarana
Betunel | São Mateus do Sul
Betunel | Araucária
CBB | Curitiba
CBB | Apucarana
Ipiranga Asfaltos | Campo Largo
Ipiranga Asfaltos | Araucária
Petrobras Distribuidora | Ponta Grossa
Petrobras Distribuidora | Curitiba
Compasa | Curitiba
Compasa | Arapoti
Brasquímica | Araucária
Emam Asfaltos | Araucária
NTA | Araucária
Asfaltos Nordeste | Araucária
Califórnia | Araucária

Santa Catarina

Califórnia | Garuva
Califórnia | Esteio
Petrobras Distribuidora | Florianópolis



Figura 2.46
Fábricas e terminais
de emulsões asfálticas
(Abeda, 2010)

Rio Grande do Sul

Betunel | Montenegro
Betunel | Canoas
Ipiranga Asfaltos | Canoas
Greca Asfaltos | Esteio
Petrobras Distribuidora | Canoas
Petrobras Distribuidora | Porto Alegre
NTA | Canoas

Região Centro-Oeste

Mato Grosso

Betunel | Cuiabá
Centro-Oeste | Cuiabá
Greca Asfaltos | Cuiabá
Emam Asfaltos | Varzea Grande
Araguaia | SINOP

Goiás

Disbral | Ap. Goiânia
Nacional | Goiânia
Ipiranga Asfaltos | Anápolis
Betunel | Goiânia

Distrito Federal

Centro-Oeste | Brasília
Petrobras Distribuidora | Brasília

Mato Grosso do Sul

Betunel | Campo Grande
Greca Asfaltos | Campo Grande

Região Sudeste

Minas Gerais

Centro-Oeste | Igarapé
Betunel | Betim
Betunel | Uberlândia
Ipiranga Asfaltos | Uberlândia
Ipiranga Asfaltos | Betim
Greca Asfaltos | Betim
Petrobras Distribuidora | Betim
Petrobras Distribuidora | Belo Horizonte
Disbral | Sarzedo
Emam Asfaltos | Ibirité
NTA | Betim
Nacional | Betim
Califórnia | Betim

Espírito Santo

Petrobras Distribuidora | Vitória

Rio de Janeiro

Probitec | Rio de Janeiro
Ipiranga Asfaltos | Rio de Janeiro
Petrobras Distribuidora | Rio de Janeiro

Betunel | Rio de Janeiro
Emam Asfaltos | Duque de Caxias
Greca Asfaltos | Rio de Janeiro
NTA | Rio de Janeiro

São Paulo

Greca Asfaltos | Guarulhos
Greca Asfaltos | São José do Rio Preto
Greca Asfaltos | São José dos Campos
Greca Asfaltos | Paulínia
Betunel | Ribeirão Preto
Betunel | Paulínia
Betunel | São José dos Campos
Betunel | Jacareí
Betunel | Presidente Prudente
Petrobras Distribuidora | São José dos Campos
Petrobras Distribuidora | Diadema
Petrobras Distribuidora | Campinas
Ipiranga Asfaltos | Paulínia
Ipiranga Asfaltos | São José dos Campos
Ipiranga Asfaltos | São Paulo
NTA | Paulínia
NTA | Bauru
NTA | São José dos Campos
Emam Asfaltos | São José dos Campos
Brasquímica | São Paulo
Brasquímica | São José dos Campos
Brasquímica | Paulínia
Centro Oeste | Paulínia
Centro Oeste | São José dos Campos
Lwart | Lençóis Paulistas
Nacional | Paulínia
Califórnia | São Paulo
Califórnia | São José dos Campos
Califórnia | Paulínia
Betumat | Santo André
Viapol | Caçapava
Viapol | Paraíso
Denver | Suzano

TABELA 2.12 ESPECIFICAÇÃO BRASILEIRA DE EMULSÕES MODIFICADAS POR POLÍMERO SBR (proposta do IBP para a ANP em 2007)

EMULSÕES CATIÔNICAS MODIFICADAS POR SBR						
Características	Métodos de Ensaio (ABNT/ASTM)	Ruptura Rápida		Ruptura Média	Ruptura Lenta	Ruptura Controlada
		RR1C-R	RR2C-R	RM1C-R	RL1C-R	RC1C-R (*)
Ensaio sobre a emulsão						
a) Viscosidade Saybolt-Furol, s, a 50°C	NBR 14491	70 máx.	100-400	20-200	70 máx.	70 máx.
b) Sedimentação, % peso máx.	NBR 6570	5	5	5	5	5
c) Peneiração 0,84mm, % peso máx.	NBR 14393	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
d) Resistência à água, % mín. de cobertura	NBR 6300					
Agregado seco		80	80	80	80	80
Agregado úmido		80	80	60	60	60
e) Mistura com cimento, % máx. ou filler silícico	NBR 6297 NBR 6302	–	–	–	2 1,2-2,0	–
f) Carga de partícula	NBR 6567	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva
g) pH, máx.	NBR 6299	–	–	–	6,5	6,5
h) Destilação	NBR 6568					
Solvente destilado, % (v/v).		0-3	0-3	0-12	nula	nula
Resíduo seco, % peso, mín.		62	67	62	60	62
i) Desemulsibilidade, % peso, mín. máx.	NBR 6569	50 –	50 –	– 50	– –	– –
Ensaio sobre o resíduo da emulsão obtidos pela ABNT NBR 14896						
a) Penetração, 25°C, 100g, 5s, 0,1mm	NBR 6576	45-150	45-150	45-150	45-150	45-150
b) Ponto de amolecimento, °C, mín.	NBR 6560	50	50	50	50	50
c) Viscosidade Brookfield, 135°C, SP 21, 20RPM, cP, mín.	NBR 15184	550	550	550	550	550
d) Recuperação elástica, 25°C, 20cm, %, mín.	NBR 15086	60	60	60	60	60

(*) Essa emulsão deve atender a Tabela 5 da instrução ABNT NBR 14948/2003 (Microrrevestimento Asfáltico a Frio Modificado por Polímero).

TABELA 2.13 ESPECIFICAÇÃO BRASILEIRA DE EMULSÕES MODIFICADAS POR POLÍMERO SBS (proposta do IBP para a ANP em 2007)

EMULSÕES CATIÔNICAS MODIFICADAS POR SBS					
Características	Métodos de Ensaio (ABNT)	Ruptura Rápida		Ruptura Lenta	Ruptura Controlada
		RR1C-S	RR2C-S	RL1C-S	RC1C-S (*)
Ensaio sobre a emulsão					
a) Viscosidade Saybolt-Furol, s, a 50°C	NBR 14491	70 máx.	100-400	70 máx.	70 máx.
b) Sedimentação, % peso, máx.	NBR 6570	5	5	5	5
c) Peneiração 0,84mm, % peso, máx.	NBR 14393	0,10	0,10	0,10	0,10
d) Resistência à água, % mín. de cobertura	NBR 6300				
Agregado seco		80	80	80	80
Agregado úmido		80	80	60	60
e) Mistura com cimento, % máx. ou fíler silícico	NBR 6297	–	–	2	–
	NBR 6302	–	–	1,2-2,0	–
f) Carga de partícula	NBR 6567	positiva	positiva	positiva	positiva
g) pH, máx.	NBR 6299	–	–	6,5	6,0
h) Destilação	NBR 6568				
Solvente destilado a 360°C, % vol.		0-1	0-1	0-1	0-1
Resíduo seco, % peso, mín.	NBR 14376	62	67	60	62
i) Desemulsibilidade, % peso, mín.	NBR 6569	50	50	–	–
Ensaio sobre o resíduo da emulsão obtido pela ABNT NBR 14896					
a) Penetração, 25°C, 100g, 5s, 0,1mm	NBR 6576	45-150	45-150	45-150	45-150
b) Ponto de amolecimento, °C, mín.	NBR 6560	50	55	55	55
c) Viscosidade Brookfield, 135°C, SP 21, 20 RPM, cP, mín.	NBR 15184	550	650	650	650
d) Recuperação elástica, 25°C, 20cm, %, mín.	NBR 15086	65	75	75	75

(*) Essa emulsão deve atender a Tabela 5 da instrução ABNT NBR 14948/2003 (Microrrevestimento Asfáltico a Frio Modificado por Polímero).

2.6 ASFALTO DILUÍDO

Os asfaltos diluídos (ADP) são produzidos pela adição de um diluente volátil, obtido do próprio petróleo, que varia conforme o tempo necessário para a perda desse componente adicionado restando o asfalto residual após a aplicação. O diluente serve apenas para baixar a viscosidade e permitir o uso à temperatura ambiente (IBP, 1999; Hunter, 2000; Shell, 2003).

No Brasil são fabricados dois tipos de asfalto diluído, chamados de cura média e de cura rápida. O termo cura refere-se à perda dos voláteis e depende da natureza do diluente utilizado. A denominação dos tipos é dada segundo a velocidade de evaporação do solvente:

- cura rápida (CR) cujo solvente é a gasolina ou a nafta;
- cura média (CM) cujo solvente é o querosene.

A segunda forma de avaliação e denominação é vinculada ao início da faixa de viscosidade cinemática de aceitação em cada classe. Por exemplo, um ligante denominado CM30 é um asfalto diluído de cura média (CM) cuja faixa de viscosidade a 60°C começa em 30cSt; um CR250 é um tipo cura rápida (CR) com 250cSt de viscosidade inicial. Nas Tabelas 2.14 e 2.15 é mostrada a especificação brasileira vigente de asfalto diluído.

TABELA 2.14 ESPECIFICAÇÃO BRASILEIRA DE ASFALTO DILUÍDO, TIPO CURA RÁPIDA (ANP, 2007)

Características	Métodos		Tipos de CR	
	ABNT/NBR	ASTM	CR-70	CR-250
<i>No asfalto diluído</i>				
Viscosidade cinemática, cSt, 60°C ou	14756	D 2170	70-140	250-500
Viscosidade Saybolt-Furol, s	14950	D 88	60-120	–
50°C			–	125-250
60°C			–	27
Ponto de fulgor (V.A. Tag) °C, mín.	5765	D 3143	–	27
Destilação até 360°C, % volume total destilado, mín.	14856	D 402	10	–
190°C			50	35
225°C			70	60
260°C			85	80
316°C			55	65
Resíduo, 360°C, % volume, mín.			55	65
Água, % volume, máx	14236	D 95	0,2	0,2
<i>No resíduo da destilação</i>				
Viscosidade, 60°C, P ²	5847	D 2171	600-2400	600-2400
Betume, % massa, mín. ²	14855	D 2042	99,0	99,0
Dutilidade, 25°C, cm, mín. ^{1, 2}	6293	D 113	100	100

¹Se a dutilidade obtida a 25°C for menor do que 100cm, o asfalto diluído estará especificado se a dutilidade a 15,5°C for maior que 100cm.

²Ensaio realizado no resíduo da destilação.

O principal uso do asfalto diluído na pavimentação é no serviço de imprimação de base de pavimentos (DNER ES 306/97). Também é possível a utilização desse produto em serviços de tratamento superficial, porém há uma tendência cada vez mais acentuada de redução de seu emprego em serviços por penetração devido a problemas de segurança e meio ambiente (emissão de hidrocarbonetos orgânicos voláteis – VOCs).

TABELA 2.15 ESPECIFICAÇÃO BRASILEIRA DE ASFALTO DILUÍDO, TIPO CURA MÉDIA (ANP, 2007)

Características	Métodos		Tipos de CM	
	ABNT/NBR	ASTM	CM-30	CM-70
<i>No asfalto diluído</i>				
Viscosidade cinemática, cSt, 60°C	14756	D 2170	30-60	70-140
Viscosidade Saybolt-Furol, s	14950	D 88	75-150	–
25°C			–	60-120
50°C				
Ponto de fulgor (V.A. Tag), °C, mín.	5765	D 3143	38	38
Destilação até 360°C, % volume total destilado, mín.	14856	D 402		
225°C			25	20
260°C			40-70	20-60
316°C			75-93	65-90
Resíduo, 360°C, % volume, mín.			50	55
Água, % volume, máx.	14236	D 95	0,2	0,2
<i>No resíduo da destilação</i>				
Viscosidade, 60°C P ²	5847	D 2171	300-1200	300-1200
Betume, % massa, mín. ²	14855	D 2042	99,0	99,0
Dutilidade, 25°C, cm, mín. ^{1, 2}	6293	D 113	100	100

¹Se a dutilidade obtida a 25°C for menor do que 100cm, o asfalto diluído estará especificado se a dutilidade a 15,5°C for maior que 100cm.

²Ensaio realizado no resíduo da destilação.

2.7 ASFALTO-ESPUMA

Uma terceira forma de diminuir a viscosidade do asfalto e melhorar a sua dispersão quando da mistura com agregados, mas ainda utilizando o CAP aquecido, é a técnica chamada de asfalto-espuma.

Foi comentado no item 2.2 que um dos requisitos do CAP é não haver espumação. No entanto, para algumas utilizações especiais, a espumação do asfalto sob condições particulares e controladas pode se mostrar uma grande aliada para melhor envolver agregados e até mesmo solos.

Essa técnica de espumação especial do asfalto consiste em se promover o aumento de volume do CAP por choque térmico pela injeção de um pequeno volume de água à

temperatura ambiente, em um asfalto aquecido, em condições controladas, dentro de uma câmara especialmente desenvolvida para isso. A Figura 2.47 ilustra essa câmara e o processo de espumação. No campo esse processo pode ser controlado por dois índices: a taxa de expansão e a meia-vida, ilustrados na Figura 2.48. Com essa expansão provocada pela espumação do ligante, há um aumento de volume que baixa a viscosidade, o que facilita o recobrimento dos agregados.

A taxa de expansão é a relação entre o volume máximo do CAP em estado de “espuma” e o volume de CAP remanescente, após a espuma estar completamente assentada. A meia-vida é o tempo em segundos necessário para uma espuma regredir do seu volume máximo até a metade desse volume.

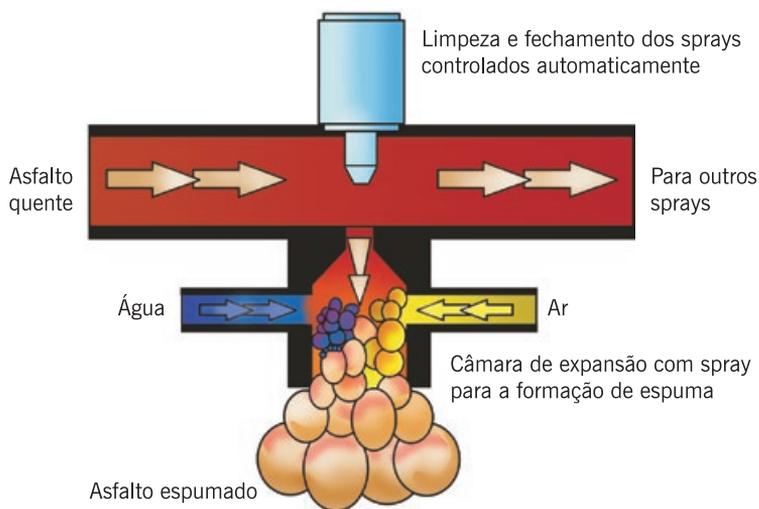


Figura 2.47 Esquema da câmara de expansão do asfalto-espuma e o processo de espumação



Figura 2.48 Exemplo de esquema de avaliação da taxa de expansão e da meia-vida de um asfalto-espuma em campo

A técnica foi originalmente proposta e usada no estado de Iowa nos Estados Unidos, entre 1957 e 1960. Depois foi aperfeiçoada na Austrália em 1968, difundiu-se pela Europa, e foi introduzida no Brasil no final da década de 1990, tendo como base exemplos observados na África do Sul.

A utilização inicialmente era prevista para estabilização de agregados fora de especificação, mas cresceu em todo o mundo para uso em manutenção de pavimentos pela técnica da reciclagem e hoje até para obras novas, por ter se mostrado muito versátil. Pode ser usada em usina estacionária ou em unidades móveis de reciclagem, permitindo uma variedade de utilizações, com economia de energia, pois pode ser adicionada ao agregado natural ou fresado, não-aquecido e até mesmo úmido, resultando em misturas menos suscetíveis aos efeitos climáticos do que as misturas com emulsão (Hunter, 2000). Seu uso está cada dia mais freqüente no Brasil e no mundo.

Maiores detalhes sobre esse material e seu emprego em pavimentação no país podem ser consultados em Pinto (2002), Dama (2003) e Castro (2003), entre outros. A especificação de serviço DNER ES-405/2000 trata da utilização de asfalto-espuma em reciclagem a frio (ver Capítulo 4).

2.8 AGENTES REJUVENESCEDORES

Como já comentado, com o passar do tempo, o ligante asfáltico vai perdendo alguns de seus componentes e sofre certo enrijecimento. Uma das técnicas atuais de recuperação da flexibilidade do ligante é a reciclagem a quente ou a frio. Para isso, é utilizado um produto especialmente preparado para funcionar como um repositor de frações maltênicas do ligante envelhecido, chamado agente rejuvenescedor.

Os agentes rejuvenescedores são utilizados em processos de reciclagem a quente, seja em usina ou *in situ*. A Tabela 2.16 mostra a especificação brasileira dos agentes rejuvenescedores. Para a execução de reciclagens a frio, são utilizados os agentes rejuvenescedores emulsionados. Na Tabela 2.17 apresenta-se a proposta de especificação feita pela Comissão de Asfalto do Instituto Brasileiro do Petróleo e Gás (IBP), uma vez que as emulsões rejuvenescedoras emulsionadas ainda não estão especificadas no país, embora já sejam de uso corrente em muitas obras de reciclagem.

TABELA 2.16 ESPECIFICAÇÃO BRASILEIRA PARA AGENTES REJUVENESCEDORES (DNC 733/97)

Características	Unidade	Especificações					
		AR1	AR5	AR25	AR75	AR250	AR500
		Mín. Máx.	Mín. Máx.	Mín. Máx.	Mín. Máx.	Mín. Máx.	Mín. Máx.
Viscosidade cinemática, 60°C	cSt	50 175	176 900	901 4.500	4.501 12.500	12.501 37.500	37.501 60.000
Ponto de fulgor (VAC) ¹	°C	218	218	218	218	218	218
Saturados	% massa	30	30	30	30	30	30
ECA, 163°C (Efeito do calor e do ar)							
Razão viscosidade ²	–	4	4	4	4	4	4
Varição de massa, máx.	%	4	4	3	3	3	3
Densidade 20/4°C		Anotar	Anotar	Anotar	Anotar	Anotar	Anotar

¹VAC – Vaso Aberto de Cleveland.

²Razão de viscosidade = $\frac{\text{Viscosidade a } 60^{\circ}\text{C após RTFOT ou TFOT}}{\text{Viscosidade a } 60^{\circ}\text{C antes RTFOT ou TFOT}}$

2.9 O PROGRAMA SHRP

O Strategic Highway Research Program (SHRP) foi estabelecido pelo Congresso dos Estados Unidos em 1987, como um plano de estudos de cinco anos, com uma verba de US\$ 150 milhões, para melhorar o desempenho, a durabilidade e a segurança das estradas. Um dos principais resultados desse programa de pesquisa foi a proposição de novos métodos de avaliação dos ligantes asfálticos para pavimentação.

Essas novas especificações passaram a ser conhecidas como Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavements*) e apresentam mudanças significativas nos procedimentos de ensaio de ligantes e misturas asfálticas, visto que privilegia a avaliação das propriedades reológicas por ensaios mais representativos das mesmas que os atuais, baseadas nos ensaios tradicionais de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade.

A base da proposta do SHRP é que os ligantes passem a ser avaliados em uma ampla faixa de temperaturas, que cubra todas as etapas do processo de mistura, espalhamento e compactação, bem como esteja associada às temperaturas do pavimento ao longo da vida útil do trecho onde aquele material será utilizado.

A especificação Superpave de ligantes mantém o valor do parâmetro de avaliação da característica fixo e verifica para qual temperatura de uso aquele material testado satisfaz o valor especificado.

Para compor essa nova classificação dos ligantes asfálticos foram estabelecidos novos ensaios realizados em temperaturas baixas, médias e altas de uso do CAP no campo. Os

TABELA 2.17 PROPOSTA DE ESPECIFICAÇÃO BRASILEIRA PARA AGENTES REJUVENESCEDORES EMULSIONADOS FEITA PELO IBP (IBP, 1999)

<i>Ensaio sobre a emulsão</i>								
Características	Unidade	Especificações						Métodos
		ARE 1	ARE 5	ARE 25	ARE 75	ARE 250	ARE 500	ABNT
Viscosidade Saybolt-Furol, 25°C, máx.	s	70	70	70	70	70	70	NBR 14491
Sedimentação, máx.	% vol	5	5	5	5	5	5	NBR 6570
Peneiração 0,84mm, máx. retido	% peso	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	NBR 14393
Carga de partícula		NA	+	NA	NA	NA	NA	NBR 6567
<i>Destilação</i>								
Solvente destilado	% vol	nula	nula	nula	nula	nula	nula	NBR 6568
Resíduo, mín.	% peso	60	60	60	60	60	60	NBR 6569
<i>Ensaio sobre o resíduo</i>								
Características	Unidade	Especificações						Métodos
		AR 1	AR 5	AR 25	AR 75	AR 250	AR 500	ABNT
Viscosidade cinemática, 60°C	cSt	50 a 175	176 a 900	901 a 4.500	4.501 a 12.500	12.501 a 37.500	37.501 a 60.000	MB826
Teor de saturados, máx.	%	30	30	30	30	30	30	–
<i>ECA, 163°C¹ (Efeito do calor e do ar)</i>								
Razão de viscosidade		4	4	4	4	4	4	MB425
Varição em massa, máx.	%	4	4	3	3	3	3	

¹O RTFOT deverá ser o padrão (ASTM D 2872). Quando aprovado pelo consumidor, o ensaio poderá ser realizado com o método ASTM D 1754 – TFOT.

Nota dos autores: a partir de 2005 o ensaio de RTFOT passou a ser normatizado pela ABNT NBR 15235.

ensaios necessários estão descritos sucintamente a seguir e uma parte da especificação é mostrada na Tabela 2.18. Os ligantes são classificados em graus de temperatura máxima e mínima em que apresentam determinadas propriedades, estabelecidas como “grau de desempenho” (PG – *performance grade* em inglês) e são, por exemplo: PG 64-22, PG 70-22, PG 76-22 entre outros, onde o primeiro número $T_{\max 20\text{mm}}$ é a temperatura de campo, a 20mm de profundidade no revestimento, mais alta durante os sete dias consecutivos mais quentes do ano e o segundo número T_{\min} , incluindo o sinal negativo, corresponde à mínima temperatura que atua no mesmo ponto do pavimento no dia mais frio do ano. Os intervalos entre classes são de 6°C nas temperaturas.

As temperaturas a serem usadas para especificar o ligante para uma determinada obra devem ser calculadas pelas expressões seguintes (Instituto do Asfalto, 2001):

$$T_{\max 20\text{mm}} = (T_{\max \text{ar}} - 0,00618 \text{ Lat}^2 + 0,2289 \text{ Lat} + 42,2) (0,9545) - 17,78 \quad (2.13)$$

Onde:

$T_{\max 20\text{mm}}$ = temperatura máxima de projeto do revestimento asfáltico à profundidade de 20mm abaixo da superfície, °C;

$T_{\max \text{ar}}$ = média das temperaturas máximas do ar dos sete dias consecutivos mais quentes do ano, °C;

Lat = latitude geográfica do local do projeto em graus.

$$T_{\min} = -1,56 + 0,72T_{\min \text{ar}} - 0,004 \text{ Lat}^2 + 6,26 \log_{10} (H + 25) - Z (4,4 + 0,52 \sigma_{\text{ar}}^2)^{1/2} \quad (2.14)$$

Onde:

T_{\min} = temperatura mínima de projeto do revestimento asfáltico à profundidade de 20mm abaixo da superfície, °C;

$T_{\min \text{ar}}$ = temperatura mínima do ar no ano, °C;

Lat = latitude geográfica do local do projeto em graus;

H = profundidade a partir da superfície, mm;

σ_{ar} = desvio padrão da temperatura média mínima do ar, °C;

Z = obtido da tabela da distribuição normal, e.g., Z = 2,055 para 98% de confiabilidade.

A seleção do ligante por clima proposta pelo programa SHRP admite carregamentos de caminhões a velocidades altas. A velocidade de carregamento prevista nas especificações dos ensaios é de 10rad/s, que corresponde a um tráfego de aproximadamente 90km/h. Em locais tais como paradas de ônibus, pedágios, estacionamentos, a velocidade de carregamento é muito menor que a estabelecida nas especificações. Verificou-se que a determinação de parâmetros reológicos, realizada a velocidades menores, como por exemplo 1rad/s, equivalente a 8km/h, reduz a resistência à deformação permanente.

Para compatibilizar essas situações de baixa velocidade, o Superpave recomenda que o grau a alta temperatura seja elevado de 6 a 12°C. Por exemplo, se o ligante selecionado pelo clima for de grau de desempenho PG 64-22, para acomodar baixas velocidades de carregamento, o projetista pode subir um grau, chegando a PG 70-22. Se estiver previsto carregamento estacionário, o projetista pode selecionar o PG 76-22. Os PG 76 e 82 não correspondem a condições climáticas habituais nos EUA, mas foram criados em função das solicitações de carregamento de baixa velocidade.

Recomenda-se ainda que, além da velocidade de carregamento, o volume de tráfego seja levado em consideração na seleção do ligante. Quando o volume de tráfego expresso pelo número N exceder certo valor, considera-se aumento de 1 PG no grau quente,

ou seja, 6°C. Quando o volume de tráfego exceder um segundo patamar considera-se aumento de 2 PG, ou seja, 12°C no grau quente. Por exemplo, num projeto em que a seleção de clima foi de PG 58-22 mas que o tráfego previsto seja muito elevado, há necessidade de um PG 70-22.

As especificações Superpave para ligantes asfálticos baseiam-se em ensaios reológicos e seus parâmetros correlacionam as características do ligante ao desempenho das misturas asfálticas em serviço. São utilizados para esse fim os seguintes equipamentos, descritos sucintamente na seqüência:

- reômetro de cisalhamento dinâmico – DSR (ASTM D 7175/2004);
- viscosímetro rotacional – RV (ASTM D 4402/2002);
- reômetro de fluência em viga – BBR (ASTM D 6648/2001);
- prensa de tração direta – DDT (ASTM D 6723/2002);
- estufa de película delgada rotacional – RTFOT (ASTM 2872/1997);
- vaso de pressão de envelhecimento – PAV (ASTM 6521/2000).

TABELA 2.18 PARTE DA ESPECIFICAÇÃO SHRP OU SUPERPAVE DE LIGANTES ASFÁLTICOS TIPO CAP (ASTM 6373 /2007)

Grau de desempenho	PG 64 -10 -16 -22	PG 70 -10 -16 -22	PG 76 -10 -16 -22	PG 82 -10 -16 -22
Ensaio				
Ligante original				
Viscosidade Brookfield (máx. 3.000cP), °C	135			
Ponto de fulgor, °C	230			
Cisalhamento dinâmico: 10 rad/s, G*/sen δ (mín. 1,0 kPa), °C	64	70	76	82
Após o RTFOT				
Variação em massa, %	< 1	< 1	< 1	< 1
Cisalhamento dinâmico 10 rad/s, G*/sen δ (mín. 2,2 kPa), °C	64	70	76	82
Após o RTFOT/PAV				
Cisalhamento dinâmico: 10 rad/s, G* sen δ (máx. 5,0 MPa), °C	31 28 25	34 31 28	37 34 31	40 37 34
Fluência (BBR) @ 60 s, °C Coef. angular, m (mín. 0,3) Módulo rigidez, S (máx. 300 MPa)	0 -6 -12	0 -6 -12	0 -6 -12	0 -6 -12
Alongamento na ruptura, °C mín. 1,0% @ 1,0mm/min.	0 -6 -12	0 -6 -12	0 -6 -12	0 -6 -12

Reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR)

O reômetro de cisalhamento dinâmico (*dynamical shear rheometer* – DSR) é usado para caracterizar as propriedades viscoelásticas do ligante. Por meio desse ensaio, mede-se o módulo complexo de cisalhamento (G^*) e o ângulo de fase (δ), submetendo uma pequena quantidade de ligante a tensões de cisalhamento oscilatórias, entre duas placas paralelas. O ângulo δ avalia a razão entre a resposta elástica e a viscosa durante o processo de cisalhamento. A Figura 2.49 mostra um reômetro das especificações SHRP. O módulo complexo e o ângulo de fase podem ser definidos como:

$$G^* = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{\gamma_{m\acute{a}x}} \quad (2.15)$$

$$\delta = \omega \cdot (\Delta t) \quad (2.16)$$

Onde:

G^* = módulo complexo de cisalhamento, Pa;

$\tau_{m\acute{a}x}$ = máxima tensão de cisalhamento aplicada, Pa;

$\gamma_{m\acute{a}x}$ = máxima deformação devido à tensão de cisalhamento aplicada;

δ = ângulo de fase;

ω = frequência angular, 1/s;

Δt = tempo de defasagem, s.

O reômetro pode ser de tensão controlada com aplicação de um torque fixo para obter uma dada deformação cisalhante, ou de deformação controlada com aplicação de um torque variável para obter uma deformação cisalhante fixa. A frequência de oscilação do DSR é 10rad/s ou 1,59Hz.



(a) Vista geral do equipamento



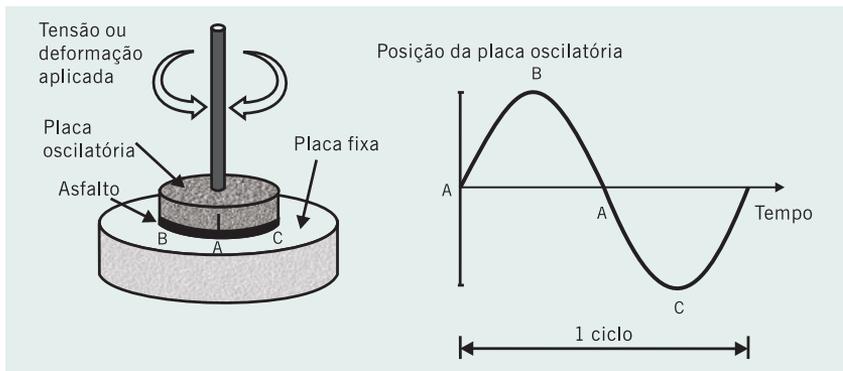
(b) Detalhe da amostra



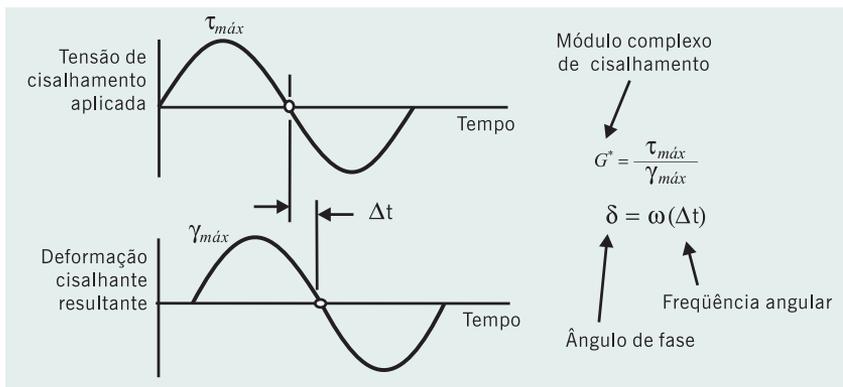
(c) Placa fixa

Figura 2.49 Exemplo de reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR)

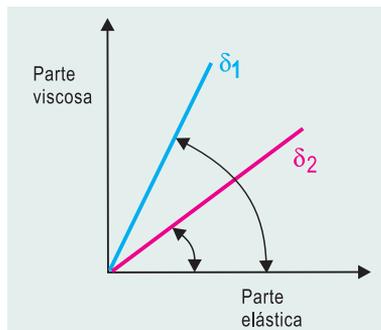
A Figura 2.50 apresenta de forma esquemática os valores de G^* e δ obtidos no ensaio com o DSR, como resposta a uma deformação cisalhante da amostra. A forma de aplicação das tensões ou deformações cisalhantes está representada esquematicamente na Figura 2.50(a). A resposta à deformação cisalhante da amostra de ligante está defasada em relação à tensão aplicada por certo intervalo de tempo Δt que representa o atraso na deformação obtida – Figura 2.50(b). A fase em atraso é expressa em medida angular, como o tempo de atraso (Δt) multiplicado pela frequência angular (ω), sendo



(a) Esquema de aplicação da tensão na amostra de asfalto



(b) Defasagem entre tensão e deformação



(c) Exemplos de resultados do ângulo de fase de dois asfaltos diferentes

Figura 2.50 Representação gráfica do modo de aplicação das tensões ou deformações cisalhantes, dos parâmetros e resultados obtidos com o DSR

representada pelo ângulo de fase (δ). Para materiais completamente elásticos, não existe atraso entre a tensão cisalhante aplicada e a deformação cisalhante obtida, sendo δ igual a 0° . Para materiais totalmente viscosos, a deformação obtida está completamente defasada e δ vale 90° . Materiais viscoelásticos, tais como os ligantes asfálticos, possuem ângulo de fase variando entre 0° e 90° , dependendo da natureza do ligante e da temperatura de ensaio. Na Figura 2.50(c), estão representados os resultados obtidos com dois tipos distintos de ligantes asfálticos 1 e 2, à mesma temperatura de ensaio, sendo que o $\delta_2 < \delta_1$, mostrando que o ligante 2 é mais elástico que o 1, ou que o ligante 1 é mais viscoso que o 2. A Figura 2.50(c) poderia representar também os ângulos de fase de um mesmo ligante asfáltico testado no DSR a duas diferentes temperaturas, sendo a temperatura 2 menor que a temperatura 1. A altas temperaturas, δ tenderia a 90° e a baixas temperaturas δ tenderia a 0° .

A especificação de ligante SHRP usa o parâmetro $G^*/\sin \delta$ para temperaturas altas ($>46^\circ\text{C}$) e $G^*\sin \delta$ para temperaturas intermediárias (entre 7°C e 34°C) como forma de controlar a rigidez do asfalto.

Controlando a rigidez a altas temperaturas, a especificação de ligante assegura que o asfalto forneça resistência ao cisalhamento global da mistura em termos de deformação a altas temperaturas. Da mesma forma, a especificação assegura que o ligante não contribua para o trincamento por fadiga, controlando sua rigidez a temperaturas intermediárias.

Reômetro de fluência em viga (BBR)

O reômetro de fluência de viga (*bending beam rheometer* – BBR) é usado na caracterização da rigidez do ligante a baixas temperaturas. Por meio desse ensaio mede-se a rigidez estática (S) e calcula-se o logaritmo do módulo de relaxação (m). Essas propriedades são determinadas a partir da resposta ao carregamento estático (*creep*) sobre uma vigota de ligante a baixas temperaturas ($-36^\circ\text{C} < T < 0^\circ\text{C}$) – Figura 2.51.

Conhecendo-se a carga aplicada sobre a vigota e medindo-se a deflexão (deslocamento vertical) ao longo do teste, a rigidez estática pode ser determinada usando-se os fundamentos da mecânica. A especificação de ligante estabelece limites para S e m em função do clima aonde o ligante será usado. Ligantes que possuam baixa rigidez estática S não trincarão em clima frio. De igual forma, ligantes que possuam altos valores de m , são mais eficientes na dissipação das tensões formadas durante a contração do ligante, quando a temperatura do pavimento cai abruptamente, minimizando a formação de trincas e fissuras. Portanto, os parâmetros S e m correlacionam-se com a formação de trincas térmicas, devidas às baixas temperaturas. O módulo de rigidez (S) e o parâmetro de relaxação (m), a baixa temperatura, são calculados pelas seguintes expressões:

$$S = \sigma / \varepsilon \quad (2.17)$$

$$m = \text{coeficiente angular a } 60\text{s } (S \times t) \quad (2.18)$$

Onde:

S = módulo de rigidez (MPa);

σ = tensão aplicada (mN);

ϵ = deformação resultante;

m = parâmetro de relaxação (MPa/s);

t = 60s.

De acordo com a especificação Superpave a rigidez S do ligante asfáltico deve ser menor do que 300MPa e o módulo de relaxação m , deve ser maior do que 0,300, para 60 segundos. Quanto maior o valor de m , mais eficiente será o ligante na dissipação das tensões geradas durante a sua contração com a do mesmo com a baixa brusca da temperatura.

Devido ao conceito de superposição tempo-temperatura, o teste é feito em 60 segundos, em vez de duas horas, à temperatura 10°C inferior à reportada. O parâmetro S é função da carga, distância entre suportes, dimensões da viga, e deflexão no tempo de 60 segundos; $m = \log S(t)/\log t$.

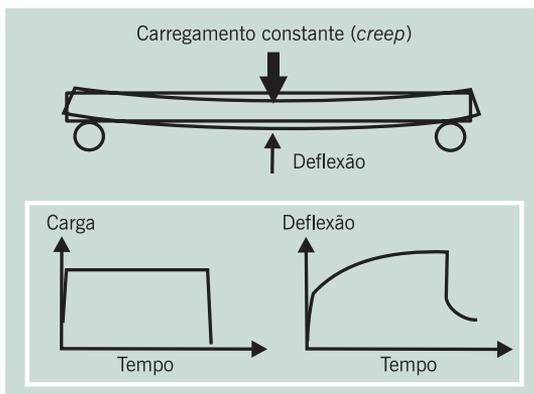
Quanto menor a rigidez S , maior a resistência ao trincamento, por isso limita-se um valor máximo para S . À medida que m diminui, a tendência é aliviar as tensões térmicas na mistura asfáltica, por isso limita-se um valor mínimo requerido para m .



(a) Vista geral do equipamento



(b) Vigota de ligante asfáltico

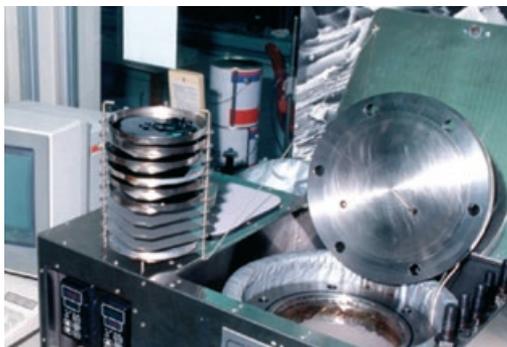


(c) Representação esquemática do carregamento e deslocamento medidos

Figura 2.51 Reômetro de viga BBR e esquema de ensaio

Vaso de envelhecimento sob pressão (PAV)

O vaso de envelhecimento sob pressão é um equipamento para simular o envelhecimento do ligante asfáltico em serviço (cerca de 10 anos) – Figura 2.52. As amostras envelhecidas por esse método são a seguir testadas no DSR, BBR e DTT para estudo do efeito do envelhecimento de longo prazo nos ligantes asfálticos. As amostras passam antes pelo envelhecimento RTFOT que simula o envelhecimento do ligante que ocorre durante a usinagem e compactação da mistura para depois ser submetido a envelhecimento no vaso de envelhecimento sob pressão (*pressure aging vessel* – PAV), que simula o endurecimento oxidativo que ocorre no ligante, ao longo da vida útil do pavimento. As amostras são colocadas em placas rasas de aço inox e envelhecidas num vaso por 20 horas a 2,1MPa de pressão de ar. A temperatura de envelhecimento é selecionada de acordo com o tipo de CAP. Depois do envelhecimento, a amostra é colocada numa estufa a vácuo para desaerar.



(a) Vista geral do equipamento



(b) Desenho esquemático dos equipamentos



(c) Detalhe das estantes para colocação das amostras

Figura 2.52 Exemplo de equipamento para ensaio de vaso de envelhecimento sob pressão – PAV

Ensaio de tração direta (DTT)

Alguns ligantes, particularmente modificados por polímero, podem exibir uma rigidez estática a baixa temperatura maior do que a desejada. Entretanto, eles podem não trincar devido à sua capacidade de deformar sem romper à baixa temperatura. Dessa forma, a especificação permite que o ligante possua uma rigidez maior, desde que se comprove,

através do teste de tração direta (*direct tension test* – DTT), que ele possui utilidade suficiente a baixas temperaturas. Por meio do DTT (Figura 2.53), obtém-se a tensão de ruptura, que é medida a partir do estiramento de uma amostra, com formato de gravatinha-borboleta, a baixa temperatura (+6°C a -36°C). De modo semelhante ao BBR, o atendimento aos critérios do ensaio DTT assegura que a ruptura do ligante, a baixa temperatura, seja minimizada.

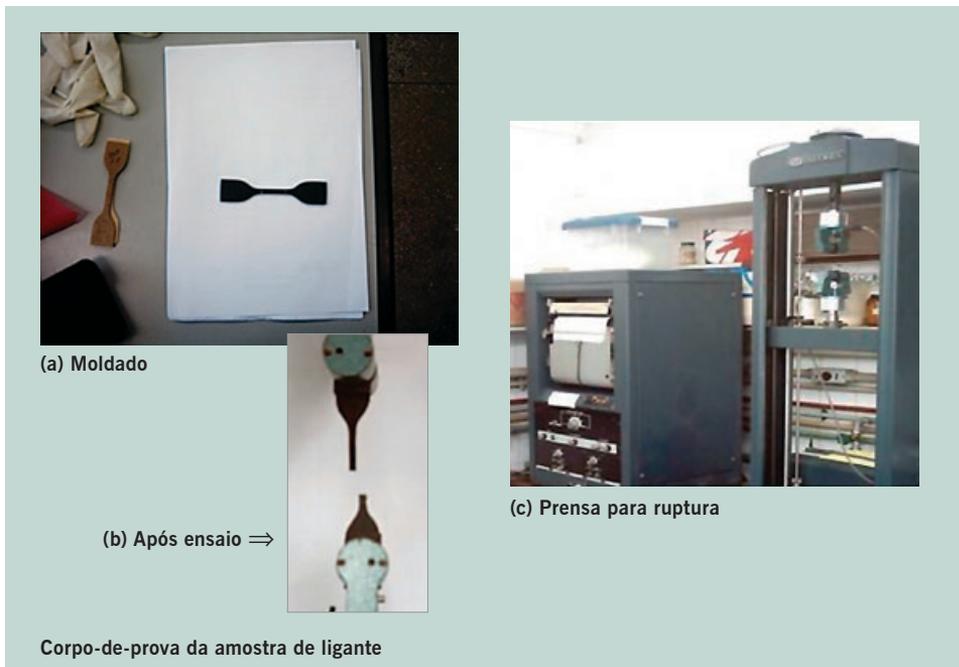


Figura 2.53 Aspectos do desenvolvimento do ensaio de tração direta – DTT

BIBLIOGRAFIA CITADA E CONSULTADA

- ABEDA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. *Manual básico de emulsões asfálticas. Solução para pavimentar sua cidade*. Rio de Janeiro: Abeda, 2001.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. P-MB 43: *método de ensaio para destilação de asfalto diluído*. Rio de Janeiro, 1965.
- _____. P-MB 326: *determinação da viscosidade Saybolt de produtos de petróleo*. Rio de Janeiro, 1965.
- _____. P-MB 425: *método de ensaio para determinar o efeito do calor e do ar sobre materiais asfálticos (método da película delgada)*. Rio de Janeiro, 1970.
- _____. P-MB 581: *viscosidade Saybolt-Furol de emulsões asfálticas*. Rio de Janeiro, 1971.
- _____. P-MB 586: *determinação do resíduo de destilação de emulsões asfálticas*. Rio de Janeiro, 1971.
- _____. P-MB 590: *determinação da desemulsibilidade de emulsões asfálticas*. Rio de Janeiro, 1971.
- _____. P-MB 609: *determinação da peneiração de emulsões asfálticas*. Rio de Janeiro, 1971.
- _____. P-MB 826: *determinação da viscosidade cinemática de asfaltos*. Rio de Janeiro, 1973.
- _____. NBR 13121: *asfalto elastomérico para impermeabilização*. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. NBR 6576: *materiais betuminosos: determinação da penetração*. Rio de Janeiro, 1998.
- _____. NBR 9619: *produtos de petróleo: determinação das propriedades de destilação*. Rio de Janeiro, 1998.
- _____. NBR 6299: *determinação do pH de emulsões asfálticas*. Rio de Janeiro, 1999.
- _____. NBR 14249: *emulsões asfálticas catiônicas: determinação expedita da resistência à água (adesividade) sobre agregados graúdos*. Rio de Janeiro, 1999.
- _____. NBR 14376: *emulsões asfálticas: determinação do resíduo asfáltico por evaporação: método expedito*. Rio de Janeiro, 1999.
- _____. NBR 14393: *emulsões asfálticas: determinação da peneiração*. Rio de Janeiro, 1999.
- _____. NBR 6302: *emulsões asfálticas: determinação da ruptura: método de mistura com filer silícico*. Rio de Janeiro, 2000.
- _____. NBR 6560: *materiais betuminosos: determinação do ponto de amolecimento: método do anel e bola*. Rio de Janeiro, 2000.
- _____. NBR 6567: *emulsões asfálticas: determinação da carga da partícula*. Rio de Janeiro, 2000.
- _____. NBR 6569: *emulsões asfálticas catiônicas: determinação da desemulsibilidade*. Rio de Janeiro, 2000.
- _____. NBR 6570: *emulsões asfálticas: determinação de sedimentação*. Rio de Janeiro, 2000.
- _____. NBR 14491: *emulsões asfálticas: determinação da viscosidade Saybolt-Furol*. Rio de Janeiro, 2000.
- _____. NBR 14594: *emulsões asfálticas catiônicas: especificação*. Rio de Janeiro, 2000.
- _____. NBR 5847: *materiais asfálticos: determinação da viscosidade absoluta*. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. NBR 6293: *materiais betuminosos: determinação da ductilidade*. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. NBR 6300: *emulsões asfálticas catiônicas: determinação da resistência à água (adesividade)*. Rio de Janeiro, 2001.

- _____. NBR 14736: *materiais asfálticos: determinação do efeito do calor e do ar: método da película delgada*. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. NBR 14756: *materiais betuminosos: determinação da viscosidade cinemática*. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. NBR 14855: *materiais betuminosos: determinação da solubilidade em tricloroetileno*. Rio de Janeiro, 2002.
- _____. NBR 14856: *asfaltos diluídos: ensaio de destilação*. Rio de Janeiro, 2002.
- _____. NBR 6297: *emulsão asfáltica de ruptura lenta: determinação da ruptura: método da mistura com cimento*. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. NBR 14950: *materiais betuminosos: determinação da viscosidade Saybolt-Furol*. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. NBR 5765: *asfalto diluído: determinação do ponto de fulgor: Vaso aberto Tag*. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. NBR 6296: *produtos betuminosos semi-sólidos: determinação da massa específica e da densidade relativa*. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. NBR 11341: *derivados de petróleo: determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland*. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. NBR 14896: *emulsões asfálticas modificadas com polímero: determinação do resíduo seco por evaporação*. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. NBR 15166: *asfalto modificado: ensaio de separação de fase*. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. NBR 15184: *materiais betuminosos: determinação da viscosidade em temperatura elevada usando um viscosímetro rotacional*. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. NBR 6568: *emulsões asfálticas: determinação do resíduo de destilação*. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. NBR 15235: *materiais asfálticos: determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional*. Rio de Janeiro, 2005.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 270-64: *methods of sampling petroleum and petroleum products*. USA, 1980.
- _____. D 36: *softening point of bitumen: ring-and-ball apparatus*. USA, 1995.
- _____. D 5: *standard test method for penetration of bituminous materials*. USA, 1997.
- _____. D 2872: *effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin-film oven test)*. USA, 1997.
- _____. D 88-94: *standard test method for Saybolt viscosity*. USA, 1999.
- _____. D 95: *standard test method for water in petroleum products*. USA, 1999.
- _____. D 113: *ductility of bituminous materials*. USA, 1999.
- _____. D 244: *standard test methods for emulsified asphalts*. USA, 2000.
- _____. D 5840: *standard specification for type II polymer modified asphalt cement for use in pavement construction*. USA, 2000.
- _____. D 5841: *standard specification for type III polymer modified asphalt cement for use in pavement construction*. USA, 2000.
- _____. D 5976: *standard specification for type I polymer modified asphalt cement for use in pavement construction*. USA, 2000.
- _____. D 6521: *standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurized aging vessel (PAV)*. USA, 2000.
- _____. D 2007: *standard test method for characteristic groups in rubber extender and processing oils and other petroleum-derived oils by the clay-gel absorption chromatographic method*. USA, 2001.
- _____. D 2042: *solubility of asphalt materials in trichloroethylene*. USA, 2001.

- _____. D 2170: *standard test method for kinematic viscosity of asphalts (bitumens)*. USA, 2001.
- _____. D 2171: *standard test method for viscosity of asphalts by vacuum capillary viscometer*. USA, 2001.
- _____. D 4124: *standard test methods for separation of asphalt into four fractions*. USA, 2001.
- _____. D 5801: *standard test method for toughness and tenacity of bituminous materials*. USA, 2001.
- _____. D 6648: *standard test method for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR)*. USA, 2001.
- _____. D 402: *standard test method for distillation of cut-back asphaltic (bituminous) products*. USA, 2002.
- _____. D 1754-97: *standard test method for effect of heat and air on asphaltic materials (thin-film oven test)*. USA, 2002.
- _____. D 4402: *viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer*. USA, 2002.
- _____. D 6723: *standard test method for determining the fracture properties of asphalt binder in direct tension (DT)*. USA, 2002.
- _____. D 6816: *standard practice for determining low-temperature performance grade (PG) of asphalt binders*. USA, 2002.
- _____. E 102: *standard test method for Saybolt-Furol viscosity of bituminous materials at high temperatures*. USA, 2003.
- _____. D 7175: *standard test method for determining dynamical shear rheometer – DSR*. USA, 2004.
- _____. D 6084: *standard test method for elastic recovery of bituminous materials by ductilometer*. USA, 2004.
- _____. D 5329: *standard test methods for sealants and fillers, hot-applied, for joints and cracks in asphaltic and portland cement concrete pavements*. USA, 2004.
- _____. D 92: *flash and fire points by Cleveland open cup tester*. USA, 2005.
- BERTOLLO, S.A.M. *Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borra-cha reciclada de pneus*. 2003. 198 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- BERTOLLO, S.A.M.; BERNUCCI, L.B.; FERNANDES, J.L.; LEITE, L.M. *Mechanical properties of asphalt mixtures using recycled tire rubber produced in Brazil – a laboratory evaluation*. Washington, DC: Transportation Research Board, 2003.
- CASTRO, L.N. *Reciclagem a frio “in situ” com espuma de asfalto*. 2003. 171 f. Dissertação (Mestrado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- DAMA, M.A. *Análise do comportamento da camada reciclada com espuma de asfalto na rodovia BR-290/RS*. 2003. 164 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- DNC – DEPARTAMENTO NACIONAL DE COMBUSTÍVEIS. Portaria n. 5, de 18 de fevereiro de 1993. Cimento asfáltico de petróleo – quadro de especificação. 1993.
- _____. Regulamento técnico DNC 03. Portaria 43/97 – especificações para asfaltos diluídos, 1997.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 007: *emulsão asfáltica: determinação de ruptura: método da mistura com cimento*. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. ME 063: *emulsões asfálticas catiônicas: determinação da desemulsibilidade*. Rio de Janeiro, 1994.

- _____. *Manual de pavimentação*. Rio de Janeiro: DNER, 1996.
- _____. *Manual de reabilitação de pavimentos*. Rio de Janeiro: DNER, 1998.
- _____. ME 002: *emulsão asfáltica: carga da partícula*. Rio de Janeiro: DNER, 1998.
- _____. ME 006: *emulsões asfálticas: determinação da sedimentação*. Rio de Janeiro, 2000.
- _____. ES 405: *pavimentação: reciclagem de pavimento a frio "in situ" com espuma de asfalto*. Rio de Janeiro, 2000.
- EUROPEAN STANDARDS. EN 12591: *bitumen and bituminous binders: specification for pavement grade bitumen*. 2000.
- _____. EN 12593: *methods of test for petroleum and its products: bitumen and bituminous binders: determination of the Fraass breaking point*. 2000.
- GIRDLER, R.B. *Constitution of asphaltenes and related studies*. Seattle: Proc. Association Asphalt Paving Technologists, 1965.
- HEUKELOM, W. A bitumen test data chart for showing the effect of temperature on the mechanical behaviour bitumens. *Journal of the Institute of Petroleum*, v. 55, n. 546, 1969.
- HUNTER, R.N. *Asphalts in road construction*. London: Thomas Telford Ed., 2000.
- HVEEM, F.N.; ZUBE, E.; SKOG, J. Proposed new tests and specifications for paving grade asphalts. *Proceedings*. Association of Asphalt Paving Technologists. AAPT. 1963.
- IA – INSTITUTO DO ASFALTO. *Manual de asfalto*. Rio de Janeiro: IA, 2001.
- IBP – INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO. *Informações básicas sobre materiais asfálticos*. Rio de Janeiro: IBP – Comissão de Asfalto, 1999.
- LCPCC – LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES. *Les émulsions de bitume et leurs applications routières*. 153 p. Paris, 1976.
- LEITE, L.F.M. *Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros*. 1999. 266 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.
- LEITE, L.F.M. *Notas de aula do Curso de Pavimentação Urbana*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2003.
- LEITE, L.; SILVA, P.; EDEL, G.; MOTTA, L.; NASCIMENTO, L. Asphalt rubber in Brazil: pavement performance and laboratory study. In: ASPHALT RUBBER, 2003, Brasília.
- LEITE, L.F.M.; TONIAL, I.A. Qualidade dos cimentos asfálticos brasileiros segundo as especificações SHRP. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 12., 1994, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: IBP, 1994. p. 94-119.
- LIBERATORI, L.A. *Estudos de cimentos asfálticos modificados por asfaltita e sua influência em misturas asfálticas*. 2000. 166 f. Dissertação (Mestrado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.
- MANO, E.B. *Introdução a polímeros*. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1985.
- _____. *Polímeros, produção e aplicação*. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1991.
- MORILHA JR., A. *Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas*. 2004. 165 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- MORILHA JR., A.; TRICHÊS, G. Análise comparativa de envelhecimento em laboratório de nove ligantes asfálticos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 34., 2003, Campinas. *Anais...* Rio de Janeiro: ABPv, 2003. p. 110-128.
- ODA, S. *Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação*. 2000. 251 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- PATRIOTA, M.B. *Análise laboratorial de concreto betuminoso usinado a quente modificado com adição de borracha reciclada de pneus – processo seco*. 2004. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

- PINHEIRO, J.H.M. *Incorporação de borracha moída de pneus em misturas asfálticas de diferentes granulometrias (processos úmido e seco)*. 2004. 124 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, 2004.
- PINHEIRO, J.H.M.; SOARES, J.B. Realização e acompanhamento de dois trechos experimentais com asfalto-borracha no Estado do Ceará. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 18., 2004, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: ANPET, 2004. v. 1, p. 01-10.
- PINTO, I.E. *Estudo das características físicas e mecânicas de misturas recicladas com espuma de asfalto*. 2002. 209 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- PINTO, S. *Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos*. 1991. 478 f. Tese (Doutorado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.
- PINTO, S.; GUARÇONI, D.; CHEQUER, C.J. *Pesquisa de asfaltos modificados por polímeros*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico, 1998.
- PINTO, S.; PREUSSLER, E.; FARAH, H. Características elásticas de concretos asfálticos com látex. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE ASFALTO, 2., 1983, Mar Del Plata, Argentina. *Anais...* 1983.
- PREGO, A.S.S. *A memória da pavimentação no Brasil*. Rio de Janeiro: ABPv, 1999.
- RAMOS, C.R.; GUARÇONI, D.; GUERREIRO, F. *Curso de ligantes asfálticos*. Rio de Janeiro: IBP, 1995.
- RAMOS, C.R.; SALATHÉ, J.E.; MARTINHO, F.G. *Processo de modificação de cimento asfáltico de petróleo com polímeros*. PI 9300610-1 Brasil de 17 fev. 93. Coperbo.
- RUWER, P.; MARCON, G.; MORILHA JR., A.; CERATTI, J. A. Aplicação de concreto asfáltico com borracha no trecho Guáiba-Camaquã da rodovia BR-116/RS. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 33., 2001, Florianópolis. *Anais...* Rio de Janeiro: ABPv, 2001. p. 1323-1332.
- SHELL. *The Shell bitumen handbook*. 5. ed. Cambridge, 2003.
- SHRP – STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM -HP -GPC and asphalt characterization literature review. SHRP – A / UIR -91 -503. 1991. 130p.
- SILVA, P.B. *Estudo em laboratório e em campo de misturas asfálticas SMA 0/8S*. 2005. 132 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- SOARES, J.B. *Notas de aula UFC*. Fortaleza, 2003.
- SPECHT, L.P. *Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus*. 2004. 279 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- TONIAL, I.A. *Influência do envelhecimento do revestimento asfáltico na vida de fadiga de pavimentos*. 2001. 244 f. Dissertação (Mestrado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- TONIAL, I.A.; BASTOS, A.C.R. *Rotas de produção de asfalto*. Relatório Interno Petrobras, 1995.
- YEN, T.F. Asphaltene/resin plus oil interconversion: an investigation into colloidal model of asphaltenes. In: WORKSHOP THE CHEMICAL COMPONENTS AND STRUCTURE OF ASPHALTIC MATERIALS, 1991, Rome, Italy. *Proceedings...*1991.
- WHITEOAK, D. *The Shell Bitumen Handbook*. 1990. 4th ed.

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

1 INTRODUÇÃO

Figura 1.1 Estruturas de pavimentos	10
Figura 1.2 Ilustração do sistema de camadas de um pavimento e tensões solicitantes (Albernaz, 1997)	10
Figura 1.3 Vias romanas	14
Figura 1.4 Estrada do Mar (<i>História das rodovias</i> , 2004)	16
Figura 1.5 Resquílios do Caminho do Ouro ou Estrada Real e pavimentação urbana em Paraty, RJ	17
Figura 1.6 Estrada União e Indústria – foto à época de sua construção (Concer, 1997)	18
Tabela 1.1 Evolução da rede rodoviária federal e estadual (km)	20

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

2 LIGANTES ASFÁLTICOS

Figura 2.1 Equipamentos utilizados no método SARA e esquema da análise química do ligante asfáltico (adaptado de Shell, 2003)	29
Figura 2.2 Representação esquemática dos componentes dos asfaltos (apud Shell, 2003)	30
Figura 2.3 Modelo de micelas de Yen (1991)	31
Figura 2.4 Representação esquemática do ligante asfáltico de comportamento Sol e Gel (Shell, 2003)	31
Figura 2.5 Modelo de estrutura do asfalto proposto pelo SHRP (apud Leite, 2003)	32
Figura 2.6(a) Esquemas de refino do petróleo para obtenção do asfalto (Tonial e Bastos, 1995)	35
Figura 2.6(b) Esquemas de refino do petróleo para obtenção do asfalto (Tonial e Bastos, 1995)	35
Figura 2.6(c) Esquemas de refino do petróleo para obtenção do asfalto (Tonial e Bastos, 1995)	36
Figura 2.6(d) Esquemas de refino do petróleo para obtenção do asfalto (Tonial e Bastos, 1995)	37
Figura 2.6(e) Esquemas de refino do petróleo para obtenção do asfalto (Tonial e Bastos, 1995)	38
Figura 2.6(f) Esquemas de refino do petróleo para obtenção do asfalto (Tonial e Bastos, 1995)	39
Figura 2.7 Localização e denominação das refinarias de petróleo brasileiras que produzem asfalto	40
Figura 2.8 Consumo brasileiro de asfalto nos últimos seis anos	41
Figura 2.9 Exemplo de equipamento manual de medida da penetração e esquema do ensaio	42
Figura 2.10 Esquema de escoamento de um fluido newtoniano	43
Figura 2.11 Equipamentos para ensaios de viscosidade absoluta e cinemática	45
Figura 2.12 Exemplo de equipamento Saybolt-Furol de ensaio de viscosidade e esquema do interior do equipamento	46
Figura 2.13 Equipamento Brookfield para medida de viscosidade de asfaltos e esquemas associados ao extensor	47
Figura 2.14 Equipamento automático para medida do ponto de amolecimento do asfalto e esquema do ensaio com equipamento mais simples	48
Figura 2.15 Esquema do ensaio de ductilidade em andamento e equipamento completo	49
Figura 2.16 Equipamentos e arranjo experimental para o ensaio de solubilidade	50
Figura 2.17 Estufa de película fina plana (TFOT) para medidas do efeito do calor e do ar (ECA) em ensaio de envelhecimento de ligante asfáltico simulado em laboratório	51
Figura 2.18 Estufa de filme fino rotativo ou película delgada rotacional (<i>Rolling Thin Film Oven Test</i> – RTFOT)	51
Figura 2.19 Envelhecimento do ligante durante a mistura com o agregado em usina, estocagem, transporte, aplicação no campo e durante vários anos de serviço (Whiteoak, 1980, apud Shell, 2003)	52
Figura 2.20 Modelos de equipamentos para o ensaio e esquema do ensaio de ponto de fulgor pelo vaso aberto de Cleveland	53
Figura 2.21 Etapas do ensaio de massa específica do ligante	54
Figura 2.22 Equipamento de ensaio de ponto de ruptura Fraass	55
Figura 2.23 Exemplo esquemático de gráfico de Heukelom para classificação de ligantes asfálticos (BTDC)	57
Figura 2.24 Representação esquemática da estrutura de um elastômero termoplástico	

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

à temperatura ambiente (Shell, 2003)	65
Figura 2.25 Representação esquemática de um elastômero termoplástico EVA	66
Figura 2.26 Equipamento de análise da interação asfalto-polímero e fases do processo de incorporação	68
Figura 2.27 Ensaio de recuperação elástica mostrando em (a) o início do alongamento; (b) ductilidade em amostra de asfalto sem modificação (ao fundo) e modificado por polímero (na frente) e (c) o mesmo ensaio de (b) após ruptura	71
Figura 2.28 Ensaio de separação de fases ou estabilidade ao armazenamento de asfalto-polímero (a) recipientes padrões colocados dentro da estufa e (b) desenho esquemático da amostragem de ligante armazenado dentro do recipiente e ensaio	73
Figura 2.29 Equipamento de ensaio de coesão Vialit e exemplo de resultado (Leite, 2003)	74
Figura 2.30 Equipamento do ensaio de tenacidade, exemplo de resultados obtidos e tela do programa de controle do ensaio	75
Figura 2.31 Esquema de fabricação do asfalto-borracha via úmida pelo processo de mistura estocável (<i>terminal blending</i>)	76
Figura 2.32 Exemplo de consistência do asfalto-borracha no momento da usinagem	77
Figura 2.33 Exemplo de usina móvel de preparação de asfalto-borracha do estado do Arizona, Estados Unidos	78
Figura 2.34 Equipamento para ensaio de recuperação elástica por torção	79
Figura 2.35 Exemplo de equipamento para ensaio de resiliência de ligantes asfálticos	80
Figura 2.36 Processo de fabricação de emulsões asfálticas (LCPC, 1976)	82
Figura 2.37 Exemplos de várias instalações de uma fábrica de emulsão	83
Figura 2.38 Esquema do ensaio de carga de partícula de uma emulsão asfáltica	86
Figura 2.39 Esquema do ensaio de determinação da sedimentação – DNER-ME 06/2000	87
Figura 2.40 Determinação do peneiramento de emulsão asfáltica	88
Figura 2.41 Determinação da desemulsibilidade de emulsões asfálticas	89
Figura 2.42 Exemplos de passos do ensaio de determinação do resíduo por evaporação	90
Figura 2.43 Aspectos do ensaio de determinação do resíduo por destilação de emulsões asfálticas	91
Figura 2.44 Etapas do ensaio de viscosidade Saybolt-Furol com emulsões	91
Figura 2.45 Determinação do pH da emulsão	92
Figura 2.46 Fábricas de emulsões asfálticas (Abeda, 2005)	93
Figura 2.47 Esquema da câmara de expansão do asfalto-espuma e o processo de espumação	98
Figura 2.48 Exemplo de esquema de avaliação da taxa de expansão e da meia-vida de um asfalto-espuma em campo	98
Figura 2.49 Exemplo de reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR)	104
Figura 2.50 Representação gráfica do modo de aplicação das tensões ou deformações cisalhantes, dos parâmetros e resultados obtidos com o DSR	105
Figura 2.51 Reômetro de viga BBR e esquema de ensaio	107
Figura 2.52 Exemplo de equipamento para ensaio de vaso de envelhecimento sob pressão – PAV	108
Figura 2.53 Aspectos do desenvolvimento do ensaio de tração direta – DTT	109

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

Tabela 2.1 Exemplos de composições químicas de asfaltos por tipo de cru (Leite, 2003)	28
Tabela 2.2 Especificações para Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) Classificação por penetração (Portaria DNC 5 de 18/2/1993) vigente até julho de 2005	60
Tabela 2.3 Especificações para Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) Classificação por viscosidade (Portaria DNC 5 de 18/2/93) vigente até julho de 2005	60
Tabela 2.4 Nova especificação brasileira de cimento asfáltico de petróleo (CAP) (ANP, 2005)	61
Tabela 2.5 Especificação de asfaltos para pavimentação da Comunidade Européia (EN 12591/2000)	62
Tabela 2.6 Benefícios de diferentes tipos de modificadores de asfalto (modificado de Shell, 2003)	65
Tabela 2.7 Especificação técnica para asfalto modificado com polímero (AMP) (DNER – Em 396/99)	69
Tabela 2.8 Especificação de asfalto-polímero (SBS) proposta pela Comissão de Asfalto IBP (2005)	70
Tabela 2.9 Características exigidas do asfalto-borracha via úmida (DER/PR ES – 28/05)	79
Tabela 2.10 Especificação brasileira de emulsões asfálticas catiônicas (Conselho Nacional de Petróleo – CNP, 07/88)	84
Tabela 2.11 Especificação de emulsões asfálticas para lama asfáltica (CNP – 17/73)	85
Tabela 2.12 Especificação brasileira de emulsões modificadas por polímero SBR (proposta do IBP para a ANP em 2006)	94
Tabela 2.13 Especificação brasileira de emulsões modificadas por polímero SBS (proposta do IBP para a ANP em 2006)	95
Tabela 2.14 Especificação brasileira de asfalto diluído, tipo cura rápida (DNC 43/97)	96
Tabela 2.15 Especificação brasileira de asfalto diluído, tipo cura média (DNC 43/97)	97
Tabela 2.16 Especificação brasileira para agentes rejuvenescedores (DNC 733/97)	100
Tabela 2.17 Proposta de especificação brasileira para agentes rejuvenescedores emulsionados feita pelo IBP (IBP, 1999)	101
Tabela 2.18 Parte da especificação SHRP ou Superpave de ligantes asfálticos tipo CAP (ASTM 63+73/1999)	103

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

3 AGREGADOS

Figura 3.1 Ilustração da análise por peneiramento	121
Figura 3.2 Graduações típicas de agregados	123
Figura 3.3 Esquema simplificado do processo de britagem (Roberts <i>et al.</i> , 1996)	125
Figura 3.4 Carregamento de um caminhão na pedreira	126
Figura 3.5 Exemplo de britador primário	126
Figura 3.6 Vista geral de uma instalação de britagem	127
Figura 3.7 Redução mecânica por impacto (Roberts <i>et al.</i> , 1996)	127
Figura 3.8 Redução mecânica combinando impacto e desgaste por atrito (Roberts <i>et al.</i> , 1996)	128
Figura 3.9 Redução mecânica combinando impacto, cisalhamento e compressão (Roberts <i>et al.</i> , 1996)	128
Figura 3.10 Redução mecânica por compressão e impacto em um britador de mandíbula que brita sem atrito (Roberts <i>et al.</i> , 1996)	129
Figura 3.11 Equipamento separador mecânico de amostras	131
Figura 3.12 Redução de amostra de agregado por quarteamento manual	132
Figura 3.13 Equipamentos para o ensaio de equivalente de areia e esquema da proveta com os materiais depositados para a leitura final	133
Figura 3.14 Equipamento para ensaio de abrasão Los Angeles	135
Figura 3.15 Equipamento utilizado no ensaio Treton	138
Figura 3.16 Conjunto de cilindro e êmbolo utilizado no ensaio de 10% de finos e prensa	139
Figura 3.17 Exemplo de equipamento para determinação do índice de forma	141
Figura 3.18 Exemplo de agregados com diferentes formas	142
Figura 3.19 Exemplo de materiais utilizados no ensaio de sanidade e resultado	144
Figura 3.20 Esquema da partícula de agregado na determinação da <i>G_{sa}</i>	145
Figura 3.21 Esquema da partícula de agregado na determinação da <i>G_{sb}</i>	146
Figura 3.22 Esquema da partícula de agregado na determinação da <i>G_{se}</i>	147
Figura 3.23 Esquema de determinação de massas no método DNER-ME 081/98	148
Figura 3.24 Esquema do ensaio de massa específica de agregados miúdos	148
Figura 3.25 Esquema do ensaio de massa específica de agregados miúdos considerando a absorção pelo método ASTM C 127	149
Figura 3.26 Equipamento para determinação da angularidade do agregado miúdo	151
Figura 3.27 Medição de partículas alongadas e achatadas	152
Tabela 3.1 Tipos de rochas comumente usados como fonte de agregados para pavimentação no país	118
Tabela 3.2 Classificação de rochas quanto ao teor de sílica presente (Metso Minerals, 2005)	119
Tabela 3.3 Dimensões nominais das peneiras segundo o DNER-ME 035/95	122

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

Tabela 3.4 Métodos de ensaio para determinação de características mecânicas de agregados e valores de aceitação (IPR, 1998)	140
Tabela 3.5 Classificação da forma das partículas (ABNT NBR 6954/1989)	142
Tabela 3.6 Critério de definição da angularidade do agregado graúdo	150
Tabela 3.7 Critério de definição da angularidade do agregado miúdo – valores mínimos	152
Tabela 3.8 Valores máximos percentuais de partículas alongadas e achatadas	153
Tabela 3.9 Valores mínimos percentuais de equivalente de areia	153

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

4 TIPOS DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

Figura 4.1	Exemplos de estrutura de pavimento novo com revestimento asfáltico	157
Figura 4.4	Exemplos de curvas granulométricas de diferentes misturas asfálticas a quente	160
Figura 4.2	Exemplos de composições granulométricas dos tipos de misturas a quente	160
Figura 4.3	Exemplo de várias frações de agregados e filer que compõem um concreto asfáltico – mistura densa ou bem-graduada e contínua	160
Figura 4.5	Exemplos de corpos-de-prova de misturas asfálticas a quente	161
Figura 4.6	Corpo-de-prova extraído de pista mostrando a composição do revestimento asfáltico	161
Figura 4.7	Exemplo da representação da granulometria segundo a especificação Superpave para um tamanho nominal máximo de 19mm	163
Figura 4.8	Exemplos de rodovias com camada porosa de atrito sob chuva	166
Figura 4.9	Aspectos da CPA no Aeroporto Santos Dumont – RJ	166
Figura 4.10	Composições granulométricas comparativas entre um SMA e um CA	169
Figura 4.11	Exemplo do aspecto de uma camada de SMA executada em pista	169
Figura 4.12	Características da faixa granulométrica <i>gap-graded</i> e a curva usada no experimento da Rodovia Rio–Teresópolis (Fritzen, 2005)	174
Figura 4.13	Aspecto da superfície do revestimento construído com a mistura indicada na Figura 4.12 (Fritzen, 2005)	174
Figura 4.14	Exemplo de aplicação de lama asfáltica em um trecho de via urbana	186
Figura 4.15	Equipamentos de LWT e WTAT usados na dosagem de microrrevestimento e lama asfáltica	187
Figura 4.16	Etapas do ensaio de coesão de dosagem de microrrevestimento asfáltico	187
Figura 4.17	Etapas do ensaio Schulze-Breuer e Ruck de dosagem de microrrevestimento asfáltico	188
Figura 4.18	Exemplos de aplicação de microrrevestimento asfáltico em rodovia de tráfego pesado como restauração funcional	189
Figura 4.19	Exemplo de aplicação de microrrevestimento asfáltico	189
Figura 4.21	Exemplo de fresadora e de serviço de fresagem em uma rodovia	190
Figura 4.20	Exemplo de um rolo de corte de uma fresadora	190
Figura 4.22	Exemplos de equipamentos do tipo fresadoras-recicladoras <i>in situ</i>	192
Figura 4.23	Esquema de tratamentos superficiais	193
Figura 4.24	Etapas construtivas de um tratamento superficial simples pelo sistema convencional	196
Figura 4.25	Exemplos de equipamentos e etapas construtivas de um tratamento superficial simples pelo sistema do equipamento especial com silos de agregado e ligante no mesmo veículo	197
Figura 4.26	Ensaio de desgaste LWT modificado para antipó (Duque Neto <i>et al.</i> , 2004)	198
Figura 4.27	Ensaio de desgaste WTAT modificado para antipó (Duque Neto <i>et al.</i> , 2004)	199
Figura 4.28	Exemplos de aplicação em campo de tratamento antipó com emulsão à base de óleo de xisto (Castro, 2003)	199

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

Tabela 4.1 Faixas granulométricas e requisitos para concreto asfáltico (DNIT 031/2004-ES)	163
Tabela 4.2 Pontos de controle de acordo com o tamanho nominal máximo do agregado (Superpave)	164
Tabela 4.3 Zona de restrição de acordo com o tamanho nominal máximo pela especificação (Superpave)	164
Tabela 4.4 Faixas granulométricas e requisitos de dosagem da camada porosa de atrito (DNER-ES 386/99)	167
Tabela 4.5 Faixas granulométricas e requisitos de SMA pela especificação alemã (ZTV Asphalt – StB 94, 2001)	170
Tabela 4.6 Faixas granulométricas norte-americanas segundo AASHTO MP 8-02	171
Tabela 4.7 Características e propriedades da mistura SMA segundo AASHTO MP 8-02	171
Tabela 4.8 Exemplo de uma faixa <i>gap-graded</i> com asfalto-borracha usada em projetos no país	173
Tabela 4.9 Exemplo de características de uma mistura <i>gap-graded</i> com asfalto-borracha usada no país	173
Tabela 4.10 Características de asfalto-borracha utilizado em projetos de <i>gap-graded</i>	173
Tabela 4.11 Faixas granulométricas e características de dosagem recomendadas pelo DNIT para AAUQ com CAP (DNIT 032/2004 – ES)	175
Tabela 4.12 Faixas granulométricas e características de dosagem recomendadas pelo DNIT para AAUQ com asfalto polímero (DNER-ES 387/99)	175
Tabela 4.13 Características de ligantes duros produzidos na França para emprego em misturas de módulo elevado (EME) (AIPCR, 1999)	177
Tabela 4.14 Revestimentos asfálticos normalizados pela AFNOR (SETRA e LCPC, 1994)	180
Tabela 4.15 Características das misturas asfálticas delgadas ($\leq 50\text{mm}$) para camada de rolamento (Brosseau, 2002b)	181
Tabela 4.16 Características das misturas asfálticas espessas ($> 50\text{mm}$) para camada de rolamento (Brosseau, 2002b)	181
Tabela 4.17 Características das misturas asfálticas para camada intermediária ou de ligação (Brosseau, 2002b)	181
Tabela 4.18 Desempenho mecânico exigido para misturas de módulo elevado EME (NF P 98-140)	182
Tabela 4.19 Desempenho mecânico exigido para misturas de módulo elevado BBME (NF P 98-141)	182
Tabela 4.20 Faixas granulométricas e características de dosagem recomendadas pelo DNIT para pré-misturados a frio (DNER-ES 317/97)	184
Tabela 4.21 Faixas granulométricas e características de mistura recomendadas pelo DNIT para lama asfáltica (DNER-ES 314/97)	186
Tabela 4.22 Exemplo de faixas granulométricas para tratamento superficial duplo DNER-ES 309/97	193

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

5 DOSAGEM DE DIFERENTES TIPOS DE REVESTIMENTO

Figura 5.1 Exemplos de corpos-de-prova de diversas formas e compactadores de misturas asfálticas	206
Figura 5.2 Esquema de componentes em uma mistura asfáltica compactada	207
Figura 5.3 Pesagem de corpos-de-prova	208
Figura 5.4 Obtenção da condição de superfície saturada seca em corpo-de-prova de mistura asfáltica compactada	209
Figura 5.5 Ilustração dos volumes considerados na determinação da DMT e da <i>Gmm</i>	210
Figura 5.6 Exemplo de procedimento para determinação da <i>Gmm</i> em laboratório	212
Figura 5.7 Ilustração dos vazios existentes entre os agregados recobertos ou entre os grumos	213
Figura 5.8 Seqüência final do procedimento para determinação da <i>Gmm</i>	213
Figura 5.9 Massas consideradas para o cálculo da <i>Gmm</i>	214
Figura 5.10 Tampa de borracha com orifício preenchido com vidro de diâmetro reduzido	215
Figura 5.11 Ilustração da volumetria em uma mistura asfáltica	217
Figura 5.12 Exemplos de compactadores Marshall	218
Figura 5.13 Exemplos de curvas de viscosidade obtidas em diferentes viscosímetros e faixas de mistura e compactação	219
Figura 5.14 Moldagem de corpos-de-prova tipo Marshall em laboratório	220
Figura 5.15 Exemplo de corpos-de-prova submersos em banho-maria e molde de compressão	223
Figura 5.16 Exemplo de equipamento de ensaio de estabilidade Marshall	223
Figura 5.17 Exemplos de curvas dos parâmetros determinados na dosagem Marshall	224
Figura 5.18 Representação esquemática dos grupos de corpos-de-prova	225
Figura 5.19 Teor de asfalto <i>versus</i> Vv e RBV	226
Figura 5.20 Exemplo de granulometria adequada à especificação Superpave	231
Figura 5.21 Ilustração esquemática e exemplo de compactador giratório Superpave (CGS)	232
Figura 5.22 Fluxograma da dosagem Superpave	233
Figura 5.23 Seqüência do procedimento de compactação Superpave	236
Figura 5.24 Curva de compactação típica obtida do CGS (Motta <i>et al.</i> , 1996)	237
Figura 5.25 Gráfico de compactação dos corpos-de-prova do exemplo	240
Figura 5.26 Curva de compactação da mistura 3 com 4,2% de ligante e Tamanho Máximo Nominal de 19mm	248
Figura 5.27 Representação esquemática dos parâmetros volumétricos de controle do SMA	250
Figura 5.28 Ensaio de escorrimento de ligante asfáltico de mistura SMA	252
Figura 5.29 Fluxograma para determinação da massa específica real média dos agregados	255
Figura 5.30 Viscosidade <i>versus</i> porcentagem de ligante novo	257
Figura 5.31 Temperatura <i>versus</i> porcentagem de ligante novo (Kandhal e Foo, 1997)	260
Figura 5.32 Determinação do teor de fresado a ser incorporado na MARQ	262
Figura 5.33 Exemplos de equipamentos para ensaios em agregados para tratamento superficial	264
Figura 5.34 Caixa dosadora para tratamento superficial (Larsen, 1985)	267

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

Figura 5.35 Exemplo de equipamento WTAT	270
Figura 5.36 Exemplo de equipamento LWT	271
Figura 5.37 Exemplo de teste de coesão	272
Figura 5.38 Exemplo de confecção de corpo-de-prova para o ensaio Schulze-Breuer e Ruck	272
Figura 5.39 Exemplo de equipamento para ensaio Schulze-Breuer e Ruck	273
Figura 5.40 Definição do teor ótimo do microrrevestimento	276
Figura 5.41 Definição do teor ótimo da lama asfáltica	280
Tabela 5.1 Exemplo da composição dos agregados (números indicam percentual passante em cada peneira)	218
Tabela 5.2 Ajuste do percentual em massa dos agregados em função do teor de asfalto (por simplificação são mostrados apenas quatro teores)	221
Tabela 5.3 Massa específica real dos constituintes (g/cm^3) e DMT da mistura em função do teor de asfalto	221
Tabela 5.4 Cálculo da massa específica das misturas compactadas (por simplificação são mostrados apenas dois corpos-de prova, quando devem ser usados três para cada teor de asfalto)	222
Tabela 5.5 Exemplos de limites de Vv e RBV para diferentes faixas granulométricas de concreto asfáltico	225
Tabela 5.6 Resultados da dosagem	226
Tabela 5.7 Requisitos de dosagem de concreto asfáltico do DNIT-ES 031/2004)	227
Tabela 5.8 Organização hierárquica do método Superpave	231
Tabela 5.9 Número de giros especificados na norma de dosagem Superpave	237
Tabela 5.10 Critérios volumétricos para escolha do teor de projeto	238
Tabela 5.11 Exemplo de compactação por amassamento (CGS)	238
Tabela 5.12 Dados dos agregados das misturas tentativas 1, 2 e 3	240
Tabela 5.13 Valores de G_{mb} corrigidos e respectivos critérios, dados como % G_{mm}	243
Tabela 5.14 Resumo das informações da compactação das misturas tentativas	244
Tabela 5.15 Resumo das informações das misturas tentativas para $Vv = 4\%$ no $N_{projeto}$	246
Tabela 5.16 Resumo das informações da mistura 3	248
Tabela 5.17 Propriedades de projeto da mistura com 4,7% de ligante	249
Tabela 5.18 Definição da fração graúda de agregado (NAPA, 1999)	251
Tabela 5.19 Especificação para misturas SMA utilizando método Marshall (NAPA, 1999)	251
Tabela 5.20 Fatores corretivos da superfície específica do método de Duriez	255
Tabela 5.21 Exemplo de composição granulométrica da mistura reciclada (% passante)	262
Tabela 5.22 Recomendação para agregados de tratamentos superficiais (Larsen, 1985)	265
Tabela 5.23 Graduação dos agregados para TST usados no exemplo	268
Tabela 5.24 Resultados dos demais ensaios	268

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

Tabela 5.25 Resultados da dosagem	269
Tabela 5.26 Requisitos para agregados usados em microrrevestimento asfáltico a frio (DNIT 035/2005-ES)	274
Tabela 5.27 Composição dos agregados para microrrevestimento	275
Tabela 5.28 Resultados dos ensaios mecânicos em microrrevestimento	275
Tabela 5.29 Dados de coesão no teor ótimo	276
Tabela 5.30 Cálculo dos índices em função do teor ótimo de emulsão	277
Tabela 5.31 Limites do teor de emulsão para faixas do DER/PR	278
Tabela 5.32 Granulometria do projeto e faixa de trabalho	279
Tabela 5.33 Composição dos agregados para lama asfáltica	279
Tabela 5.34 Resultados dos ensaios mecânicos em lama asfáltica	280
Tabela 5.35 Cálculo dos índices em função do teor ótimo de emulsão	280

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

6 PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Figura 6.1	Exemplo de equipamento e resultado do ensaio de estabilidade Marshall	289
Figura 6.2	Ilustração do ensaio de compressão diametral e estado de tensões gerado	292
Figura 6.3	Arranjo dos LVDTs para medidas de deslocamentos horizontais e verticais	293
Figura 6.4	Exemplos de equipamento para ensaio de compressão diametral de carga repetida	295
Figura 6.5	Exemplos de arranjos experimentais para a colocação dos medidores de deslocamento ao corpo-de-prova para o ensaio de MR	295
Figura 6.6	Duração dos tempos de carregamento e repouso	296
Figura 6.7	Parcelas dos deslocamentos resilientes e permanentes registrados durante ensaios de módulo de resiliência	297
Figura 6.8	Forma do pulso de carregamento (adaptado de NCHRP-285)	298
Figura 6.9	Subdivisões do pulso de deslocamento	298
Figura 6.10	Regressões das porções de descarregamento do pulso de deslocamento	299
Figura 6.11	Deslocamento resiliente instantâneo	300
Figura 6.12	Deslocamento resiliente total	300
Figura 6.13	Desenho esquemático do comportamento viscoelástico sob carregamento harmônico	304
Figura 6.14	Exemplos de equipamentos usados na determinação do módulo complexo	305
Figura 6.15	Curva mestra de módulo dinâmico	306
Figura 6.16	Serragem da face do corpo-de-prova	307
Figura 6.17	Retirada do núcleo do corpo-de-prova	307
Figura 6.18	Exemplo da realização do ensaio em uma máquina universal	308
Figura 6.19	Esquema do ensaio de compressão diametral	309
Figura 6.20	Exemplo de equipamento para ensaio de RT	310
Figura 6.21	Estágios existentes num processo de fadiga	312
Figura 6.22	Exemplos de equipamentos para ensaios de fadiga	313
Figura 6.23	Vida de fadiga considerando diferentes faixas granulométricas	314
Figura 6.24	Representação das tensões no centro da amostra de um corpo-de-prova cilíndrico	314
Figura 6.25	Deformações permanentes em pavimentos asfálticos	316
Figura 6.26	Exemplos de equipamentos e arranjos experimentais para o ensaio de <i>creep</i>	319
Figura 6.27	Posicionamento dos LVDTs para registro de deslocamento axial no ensaio de <i>creep</i>	319
Figura 6.28	Informações do ensaio de <i>creep</i>	319
Figura 6.29	Função fluência e respectivo ajuste para a série de Prony (Souza e Soares, 2003)	319
Figura 6.30	Carregamento e deformação no ensaio de <i>creep</i> dinâmico	321
Figura 6.31	Conjunto de mesa compactadora e simulador de tráfego LCPC para ensaios de deformação permanente em laboratório	322

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

Figura 6.32 Resultados de deformação permanente de misturas asfálticas no ensaio de simulador de tráfego LCPC	323
Figura 6.33 Percentual de afundamento <i>versus</i> teor de asfalto para 30.000 ciclos no simulador de tráfego LCPC (Bernucci <i>et al.</i> , 2002)	324
Figura 6.34 Compactador e simulador APA	325
Figura 6.35 Simulador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, Portugal	326
Figura 6.36 Simulador da Universidade da Carolina do Norte	326
Figura 6.37 Exemplo de aparelho de abrasão Los Angeles utilizado para o ensaio Cântabro	328
Figura 6.38 Exemplos de corpos-de-prova submetidos ao ensaio Cântabro indicando a determinação do resultado pela média de três corpos-de-prova	329
Figura 6.39 Passos para o condicionamento e para a determinação da RT	331
Tabela 6.1 Módulos de resiliência e resistência de misturas investigadas no país (25°C)	302
Tabela 6.2 Ensaio de sensibilidade à umidade para corpos-de-prova compactados (Solaimanian <i>et al.</i> , 2004)	329
Tabela 6.3 Resultados de RT, RT _u e RRT para duas misturas asfálticas analisadas (Vasconcelos, 2004)	331

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

7 MATERIAIS E ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Figura 7.1 Pavimento de concreto de cimento Portland	337
Figura 7.2 Pavimento asfáltico	337
Figura 7.3 Classificação MCT (Nogami e Villibor, 1981)	341
Figura 7.4 Etapas do ensaio ISC	343
Figura 7.5 Esquema e exemplo de equipamento de ensaio triaxial de carga repetida	347
Figura 7.6 Tensões aplicadas e deslocamentos no ensaio de carga repetida	348
Figura 7.7 Modelos clássicos de comportamento resiliente de solos	349
Figura 7.8 Outros comportamentos de solos quanto à resiliência	350
Figura 7.9 Outros ensaios de resistência em materiais cimentados quimicamente	351
Figura 7.10 Materiais granulares empregados em bases, sub-bases ou reforços	353
Figura 7.11 Solos e solo-agregados empregados em bases, sub-bases ou reforços	354
Figura 7.12 Lateritas, saibros e materiais reciclados empregados em bases, sub-bases ou reforços	355
Figura 7.13 Materiais cimentados empregados em bases, sub-bases ou reforços	356
Figura 7.14 Tipos de solo-agregado (Yoder e Witczak, 1975)	359
Figura 7.15 Estruturas típicas de pavimentos asfálticos	366
Figura 7.16 Estruturas típicas de pavimentos asfálticos	367
Figura 7.17 Estruturas típicas de pavimentos asfálticos	368
Tabela 7.1 Emprego recomendado de solos tropicais em obras viárias (modificado de Nogami e Villibor, 1995)	341
Tabela 7.2 Faixas A, B, e C de solos arenosos finos lateríticos para bases e sub-bases de pavimentos (DER-SP, 1991)	361
Tabela 7.3 Valores de propriedades mecânicas e hidráulicas que o solo arenoso fino deve seguir para ser empregado como base de pavimento (DER-SP, 1991)	361

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

8 TÉCNICAS EXECUTIVAS DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

Figura 8.1 Representação esquemática de uma usina asfáltica por batelada (Asphalt Institute, 1998)	374
Figura 8.2 Representação esquemática de uma usina asfáltica contínua (Asphalt Institute, 1998)	375
Figura 8.3 Exemplo de uma usina asfáltica por batelada ou gravimétrica	375
Figura 8.4 Exemplo de uma usina asfáltica contínua	375
Figura 8.5 Exemplo de estoques e silos cobertos para proteção dos materiais de uma usina gravimétrica	376
Figura 8.6 Exemplo de tanques horizontais para armazenamento com aquecimento de ligantes asfálticos de uma usina gravimétrica	376
Figura 8.7 Exemplo de sistema de silos frios	377
Figura 8.8 Exemplo de controle de alimentação de agregados de um silo frio e correia transportadora de agregados para o secador	378
Figura 8.9 Exemplo de secador e sistema de aquecimento para secagem dos agregados	378
Figura 8.10 Secador de fluxo paralelo (Asphalt Institute, 1998)	379
Figura 8.11 Secador de contra-fluxo (Asphalt Institute, 1998)	379
Figura 8.12 Esquema de coletores primário e secundário (Asphalt Institute, 1998)	380
Figura 8.13 Exemplo de sistema de coletores de pó	380
Figura 8.14 Esquema de unidade de peneiramento de usina asfáltica por batelada (Asphalt Institute, 1998)	381
Figura 8.15 Exemplo de um elevador de agregados aquecidos e silos quentes	382
Figura 8.16 Esquema de produção de uma batelada de mistura asfáltica (Asphalt Institute, 1998)	382
Figura 8.17 Esquema de tambor secador-misturador de fluxo paralelo em usina contínua (Asphalt Institute, 1998)	383
Figura 8.18 Esquema de tambor secador-misturador de contrafluxo de usina contínua (Asphalt Institute, 1998)	383
Figura 8.19 Exemplo de usina estacionária para produção de misturas a frio	385
Figura 8.20 Exemplo de usina de pré-misturado a frio móvel	385
Figura 8.21 Esquema de componentes de uma vibroacabadora de pneus (Asphalt Institute, 1998)	387
Figura 8.22 Esquema do fluxo de mistura asfáltica em uma vibroacabadora de esteiras (Asphalt Institute, 1998)	388
Figura 8.23 Exemplo de um tipo de vibroacabadora	388
Figura 8.24 Exemplos de densímetros para determinação da massa específica <i>in situ</i>	390
Figura 8.25 Exemplos de rolo de pneus e rolo tandem liso	390
Figura 8.26 Exemplo de rolo vibratório	391
Figura 8.27 Exemplo de padrão de rolagem de uma camada de mistura asfáltica	391
Figura 8.28 Definição do padrão de rolagem	392

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

Figura 8.29	Esquema de padrão de rolagem em pista com mudança de inclinação transversal no eixo longitudinal	392
Figura 8.30	Esquema de padrão de rolagem em pistas com extremidade desconfiada	392
Figura 8.31	Exemplo das etapas de construção de um tratamento superficial	394
Figura 8.32	Exemplos de equipamento multidistribuidor para execução de tratamentos superficiais por penetração invertida	395
Figura 8.33	Seqüência esquemática de construção de um tratamento superficial	396
Figura 8.34	Exemplo de aplicação de tratamento superficial por penetração invertida	396
Figura 8.35	Exemplo de equipamento para produção e aplicação de lama asfáltica	397
Figura 8.36	Exemplos de aplicação de lama asfáltica	398
Figura 8.37	Exemplos de equipamento e execução de microrrevestimento a frio	399
Figura 8.38	Etapas da execução de <i>cape seal</i>	400
Tabela 8.1	Exemplo de temperaturas de estocagem e usinagem de alguns ligantes asfálticos e do agregado (ilustrativas)	377
Tabela 8.2	Fatores que afetam o tempo de rolagem	393

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

9 DIAGNÓSTICO DE DEFEITOS, AVALIAÇÃO FUNCIONAL E DE ADERÊNCIA

Figura 9.1 Variação da serventia com o tráfego ou com o tempo decorrido de utilização da via	405
Figura 9.2 Variação da carga dinâmica de dois eixos legais trafegando em uma via com elevada irregularidade (Fernandes Jr. e Barbosa, 2000)	405
Figura 9.3 Período recomendável para a manutenção dos pavimentos	406
Figura 9.4 Período recomendável para a manutenção dos pavimentos	407
Figura 9.5 Diversas faixas de variação do IRI dependendo do caso e situação (Sayers e Karamihias, 1998)	408
Figura 9.6 Perfilógrafo do Departamento de Transportes de Illinois (Carey, Huckins e Leathers, 1962)	409
Figura 9.7 Perfilômetro da AASHO empregado inicialmente na avaliação de suas pistas experimentais (Carey, Huckins e Leathers, 1962)	409
Figura 9.8 Exemplo de levantamento da irregularidade longitudinal por nível e mira (Queiroz, 1984)	410
Figura 9.9 Exemplo de equipamento <i>dipstick</i> e esquema de funcionamento	410
Figura 9.10 Exemplo de equipamento APL francês	411
Figura 9.11 Exemplo de equipamento munido de barra com ultra-som	411
Figura 9.12 Exemplos de equipamentos medidores de irregularidade de classe II	411
Figura 9.13 Exemplo de equipamento Merlin medidor de irregularidade	412
Figura 9.14 Princípio de funcionamento de equipamento tipo-resposta (Gillespie <i>et al.</i> , 1980)	413
Figura 9.15 Fendas	417
Figura 9.15 Fendas (continuação)	418
Figura 9.16 Afundamentos e escorregamentos	419
Figura 9.17 Escorregamento, corrugação e exsudação	420
Figura 9.18 Desgaste, desagregação, polimento de agregados	421
Figura 9.19 Panelas e remendos	422
Figura 9.20 Outros defeitos	423
Figura 9.21 Treliça metálica para medida dos afundamentos em trilhas de roda	424
Figura 9.22 Exemplo de demarcação de áreas para inventário de defeitos	425
Figura 9.23 Exemplo de planilha empregada para levantamento do estado de superfície pela norma do IGG	426
Figura 9.24 Exemplo de planilha de cálculo do IGG	427
Figura 9.25 Micro e macrotextura na superfície de um revestimento asfáltico	430
Figura 9.26 Operação do pêndulo britânico para a determinação do valor de resistência à derrapagem	431
Figura 9.27 Equipamentos e passos do ensaio de mancha de areia	431
Figura 9.28 Exemplo de mancha de areia em dois tipos de revestimento com macrotexturas distintas	432

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

Figura 9.29 Exemplo de equipamento de medida de atrito μ Meter	433
Figura 9.30 Resultados de coeficiente de atrito longitudinal medido em três tipos diferentes de revestimentos asfálticos e a diferentes velocidades (modificado de Brosseaud, 2002)	434
Figura 9.31 Exemplo de arranjos de conjunto de equipamentos para medições de ruído gerado com a contribuição do pavimento (Láo, 2004)	436
Figura 9.32 Exemplo de resultados obtidos em medições de ruído em campo e em laboratório (Láo, 2004)	437
Tabela 9.1 Níveis de serventia (DNIT, 2003c)	404
Tabela 9.2 Conceitos do índice de gravidade global IGG por faixa de valores	428
Tabela 9.3 Classificação da textura de um pavimento	430
Tabela 9.4 Classes de microtextura (ABPv, 1999)	431
Tabela 9.5 Classes de macrotextura (ABPv, 1999)	432

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

10 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Figura 10.1 Representações esquemáticas de curvas de desempenho de um pavimento e etapas de restauração	442
Figura 10.2 Exemplos de extração corpos-de-prova e de poços de sondagem em pavimentos em uso	444
Figura 10.3 Exemplo de equipamentos DCP de avaliação estrutural expedita de subleitos e camadas de solo	444
Figura 10.4 Equipamento de avaliação expedita do módulo elástico do pavimento	444
Figura 10.5 Defeitos estruturais de trincamento e afundamento por repetição de cargas	445
Figura 10.6 Esquema da viga Benkelman (DNER ME 24/94) e exemplo de medida em campo	447
Figura 10.7 Passos do ensaio com a viga Benkelman	448
Figura 10.8 Esquema de leituras com a viga Benkelman para obtenção da deformada	449
Figura 10.9 Esquema de medida e cálculo do raio de curvatura	449
Figura 10.10 Esquema de um defletômetro de impacto	450
Figura 10.11 Exemplos de modelos de FWD	451
Figura 10.12 Exemplo de modelo de centro de calibração de FWD	451
Figura 10.13 Esquema de medidas com o FWD	452
Figura 10.14 Esquema dos dados necessários para se fazer uma retroanálise de pavimento (Nóbrega, 2003)	453
Figura 10.15 Diferentes formas de bacia deflectométrica indicam diferentes capacidades de carga para a mesma deflexão máxima (Nóbrega e Motta, 2003)	455
Figura 10.16 Tela do programa RETRAN2CL (Albernaz, 1997)	457
Figura 10.17 Exemplos de simuladores de tráfego	459
Figura 10.18 Exemplos de simuladores de tráfego tipo HVS – <i>heavy vehicle simulator</i> em outros países	460

Sem tabelas

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

11 TÉCNICAS DE RESTAURAÇÃO ASFÁLTICA

Figura 11.1 Exemplo de delimitação dos segmentos homogêneos pelo método das diferenças acumuladas (AASHTO, 1993)	466
Figura 11.2 Exemplo de selagem de trincas	467
Figura 11.3 Posicionamento de geotêxtil em pavimento recapeado	469
Figura 11.4 Exemplo de execução de geotêxtil em restauração de revestimento asfáltico	470
Figura 11.5 Exemplo de execução de geogrelha em restauração de revestimento asfáltico	471
Figura 11.6 Posicionamento da camada intermediária de alívio de tensões	472
Figura 11.7 Posicionamento de camada de interrupção de trincas	473
Figura 11.8 Reciclagem com espuma de asfalto	474
Tabela 11.1 Exemplo de aplicação do procedimento para delimitação em segmentos homogêneos (AASHTO, 1993)	465

ÍNDICE REMISSIVO DE TERMOS

A

AASHTO, 287, 306, 346, 404, 406, 464
abrasão, 116, 124, 133, 153, 187, 269, 273, 395
abrasão Los Angeles, 134, 140, 261, 273, 327, 357
absorção, 142, 149, 167, 216, 271, 435
aderência, 165, 179, 403, 429, 430, 483
adesão, 116, 187, 264, 273, 275, 280
adesividade, 64, 118, 143, 328, 421
afundamento de trilha de roda, 322, 417, 443
afundamentos, 322, 414, 416, 417, 419, 424, 442, 443, 445
agentes rejuvenescedores, 41, 99, 188, 190, 256, 473
agregado, 115, 207
 artificial, 119
 britado, 124
 gráudo, 120, 132, 139, 142, 150, 152
 miúdo, 85, 120, 148, 150, 151
 natural, 99, 116
 propriedades (ver propriedades dos agregados)
 reciclado, 116, 119, 351, 352, 355, 362
alcatrão, 25, 26
amostragem, 73, 130, 142, 387
amostragem de agregados, 130
análise granulométrica, 122, 132
análise petrográfica, 117
análise por peneiramento, 119, 121, 122, 125, 139
angularidade de agregado, 150, 151, 152, 240, 261

ângulo de fase, 104, 260, 290, 303
areia, 116, 119, 120, 141, 151, 164, 174, 341, 354, 356, 363, 430
areia-asfalto, 174, 253, 328
areia-cal-cinza volante, 356
argila, 132, 143, 150, 153, 340, 341, 354, 358, 360, 363
argila calcinada, 119, 134
argila expandida, 119
aromáticos, 27, 30, 37, 51, 64
asfaltenos, 27, 30, 32, 68, 176
asfalto, 25, 27, 30, 34, 41, 58, 100
 asfalto-borracha, 75, 162, 165, 172, 302, 324, 377
 asfaltos diluídos, 81, 96
 asfalto-espuma, 38, 41, 97, 441
 asfalto modificado por polímeros, 59, 63, 67, 69, 92, 162, 174, 377, 472
 asfalto natural, 26
 composição química, 27
 especificação brasileira, 58, 61, 83, 94, 95, 96, 97, 99
 especificação européia, 62
 especificação SHRP, 32, 100, 102, 103
 produção, 32, 33, 34, 39
 programa SHRP, 100
 propriedades físicas-ensaios, 41
 coesividade Vialit, 72
 densidade relativa, 53
 durabilidade, 49
 dutilidade, 49
 espuma, 53
 estabilidade à estocagem, 72
 fragilidade e tenacidade, 73
 massa específica, 53
 penetração, 42

 ponto de amolecimento, 48
 ponto de fulgor, 52
 ponto de ruptura Fraass, 54
 recuperação elástica, 70
 reômetro de cisalhamento dinâmico, 104
 reômetro de fluência em viga (BBR), 106
 retorno elástico, 70
 separação de fases, 72
 suscetibilidade térmica, 55
 solubilidade, 49
 tração direta (DTT), 108
 vaso de envelhecimento sob pressão (PAV), 108
 viscosidade, 43
avaliação, 403, 441
 de aderência em pistas molhadas, 429
 estrutural, 9, 441, 463
 funcional, 9, 403, 441, 463
 objetiva, 424
 subjativa, 404, 409

B

“bacia de deflexão, bacia de deformação”, 445, 452
basalto, 116, 118, 119, 142, 143
base (camada de pavimento), 176, 183, 194, 337, 339
base asfáltica, 176
BBM, BBME, BBTM, BBUM, 176, 177, 179, 180, 181, 182
betume (ver asfalto), 25, 26, 49
bica corrida, 353, 357
bombeamento de finos, 416, 423
borracha (ver asfalto-borracha), 59, 62, 63, 65, 75
brita graduada simples, 352, 353, 357

brita graduada tratada com cimento, 352, 356, 362
britador, 124, 127
britagem, 124
Brookfield, 47
buraco (panela), 415, 416, 422, 425

C

camada(s)
“de base; de sub-base”, 352
“de dissipação de trincas (de absorção de trincas; anti-reflexão de trincas)”, 468, 469
de módulo elevado, 162, 165, 176
de reforço do subleito, 337, 339
de rolamento (ver revestimento asfáltico), 9, 162, 176, 468, 473
de revestimento intermediárias, 9, 162, 179, 183, 187, 253, 472
intermediárias de alívio de tensões, 472
porosa de atrito (ver revestimento drenante), 159, 161, 165, 253, 328, 434, 468
superficiais de revestimentos delgados, 165, 179, 473
caminhão espargidor, 393, 396
Cannon-Fenske, 44, 45
Cannon-Manning, 44, 45
CAP (cimento asfáltico de petróleo) (ver asfalto)
capa selante, 183, 193, 395
cimento asfáltico de petróleo (ver asfalto)
classificação de agregados, 116, 119, 142
classificação de asfaltos, 41, 43, 60, 100
classificação de defeitos, 415
classificação de solos, 340, 341
classificação de textura, 430, 432
coesão (coesividade), 49, 72, 187, 194, 271, 338, 342, 352
coletores de pó (filtros de manga), 380
compactação, 389

compactador giratório (Superpave), 230, 232
compatibilidade, 66, 67, 72, 129, 271
compressão, 10, 127, 195, 289, 308, 311, 330, 338, 350, 352, 470
compressão uniaxial não-confinada (*creep*), 317
concreto asfáltico, 158, 159, 161, 162, 217, 302, 432, 468
concreto asfáltico de módulo elevado, 162, 165, 176, 302, 311, 352
concreto asfáltico delgado, 177, 178
concreto asfáltico denso, 161, 162
cone de penetração dinâmico (DCP), 345, 443, 444
contrafluxo, 379, 383, 384
corrugação, 415, 416, 420, 425, 427
creep, 106, 317, 318, 319, 320, 321
cura, 96, 254, 351, 363, 364, 397, 399
curva de Fuller, 229
curvas granulométricas (ver granulometria), 123, 261

D

DCP (*dynamic cone penetrometer cone* de penetração dinâmico), 345, 444
defeitos de superfície, 413, 414, 415, 416
deflexão, 346, 443, 445, 446, 448, 454, 463, 464
deformação, 43, 49, 104, 105, 304, 313, 315, 443
deformação permanente (ver afundamento em trilha de roda), 316, 317, 320, 321, 322, 443
degradação, 133, 134, 137, 139
densidade (ver massa específica) específica, 144
específica Rice, 210
máxima medida, 209
máxima teórica, 209
relativa, 53, 145, 147

densímetro com fonte radioativa, 390
densímetro eletromagnético, 390
desagregação (ver desgaste, descolamento, *stripping*), 415, 416, 421, 422
descolamento, 129, 419, 421
desempenho, 101, 373, 401, 403, 441, 442, 457
desgaste, 134, 135, 327, 415, 416, 421, 423
deslocamento, 289, 291, 297, 298, 299, 300, 301, 318, 321, 346, 348, 421, 443, 445, 446
diorito, 118, 119
distribuidor de agregados, 197, 393
dosagem, 157, 205, 217, 227, 229, 253, 256, 258, 259, 266, 269, 274, 277
dosagem ASTM, 217, 235
dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente, 256
dosagem Marshall, 206, 217, 224, 227
dosagem Superpave, 229, 233, 259
drenagem superficial, 264, 407
DSC, 33, 58
DSR, 104, 105
DTT, 108, 109
durabilidade, 49
dureza, 124, 134, 178
dureza dos agregados, 134

E

elastômeros, 62, 63
EME, 162, 165, 176, 178, 179, 180, 181, 182
emulsão aniônica, 81, 84, 85
emulsão asfáltica, 81, 82, 83, 84, 92, 93
emulsão catiônica, 81, 82, 84
endurecimento, 34, 49, 52, 108
endurecimento do ligante asfáltico, 34, 51, 52
ensaio
azul-de-metileno, 187, 275, 279
bandeja, 266, 267
Cântabro, 167, 253, 328

carga de partícula, 86
desemulsibilidade, 89
determinação do pH, 92
10% de finos, 134, 139, 140
efeito do calor e do ar, 49
equivalente de areia, 132, 133, 153
espuma, 53
estabilidade à estocagem, 67, 72
flexão, 291, 303
mancha de areia, 430, 431, 432
pêndulo britânico, 430, 431
peneiração, 88
penetração, 42
placa, 266
ponto de amolecimento, 48
ponto de fulgor, 52, 53
ponto de ruptura Fraass, 54, 55
recuperação elástica por torção, 78, 79
resíduo por destilação, 90, 91
resíduo por evaporação, 90
sanidade, 143, 144
Schulze-Breuer and Ruck, 188, 271, 272, 273
sedimentação, 87
separação de fases, 72, 73
solubilidade, 49, 50
tenacidade, 73, 74, 75
tração direta, 108, 109
tração indireta, 308
Tretón, 137, 138
viscosidade, 43, 45, 46, 91
envelhecimento, 49, 50, 51, 52, 108
escória de aciaria, 119, 355
escória de alto-forno, 119
escorregamento, 419, 420
especificação brasileira de asfalto diluído, 96, 97
especificação brasileira de emulsões asfálticas catiônicas, 84
especificação brasileira de emulsões asfálticas modificadas por polímero, 94, 95
especificação de emulsões asfálticas para lama asfáltica, 85
especificações para cimento asfáltico de petróleo, 60

espuma de asfalto, 53, 192, 474
estabilidade, 67, 72, 92, 121, 132, 222, 223, 288
estocagem, 33, 36, 37, 38, 67, 72, 376, 384
estufa de filme fino rotativo, 50, 51
estufa de película fina plana, 50, 51
EVA, 66, 67, 68
expressão de Duriez, 255
exsudação, 415, 416, 420

F

fadiga, 288, 311, 312, 313, 315, 316, 445
feldspato, 117, 119
fendas, 117, 119
fibras, 172, 252
fíler, 120, 160
filtro de mangas, 380
fluência, 106, 222, 318
fluxo paralelo, 379, 383
forma dos agregados, 141, 142, 172
fórmula de Vogt, 254
fragilidade, 73
fresadoras, 189, 192
fresagem, 188, 190, 191, 468
fundação, 337
FWD, 445, 448, 450, 451, 452

G

gabro, 118, 119
GB, 176, 179, 180
gel, 28, 30, 31
geogrelhas, 471
geossintéticos, 469
geotêxteis, 469, 470
gerência, 403, 413, 441
gnaisse, 117, 118, 362
graduação, 122, 123, 131, 159, 161, 169, 172, 183, 229, 264, 323
graduação aberta, 122, 159
graduação com intervalo, 172
graduação densa, 122, 159
graduação descontínua, 159
graduação do agregado, 159
graduação uniforme, 123

gráfico de Heukelom, 56, 57
granito, 117, 118, 119
grau de compactação, 389
grau de desempenho, 101, 259
grumos, 88, 89, 132, 213, 216

H

hidrocarbonetos, 25, 27, 30, 33, 37
hidroplanagem, 429, 433
histórico, 11, 16
Hveem, 50, 291, 346

I

IBP, 70, 80, 99, 291
IFI, 434
IGG, 415, 424, 427, 428, 429
IGI, 427, 428
impacto, 72, 127, 128, 205, 206, 448
imprimação, 97, 414
índice de atrito internacional, 434
índice de degradação após compactação Marshall, 139, 140
índice de degradação após compactação Proctor, 137
índice de degradação Washington, 136
índice de forma, 141, 264
índice de gravidade global, 415, 424, 428
índice de gravidade individual, 427, 428
índice de irregularidade internacional, 407
índice de penetração, 55, 56
índice de suporte Califórnia, 342
índice de susceptibilidade térmica, 41
IRI, 407, 408, 413
irregularidade, 404, 405, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413
irregularidade longitudinal, 407, 410

J

juntas, 76, 469, 472

L

lama asfáltica, 85, 185, 186, 187, 269, 277, 397
laterita, 119, 355, 362
ligantes asfálticos modificados com polímeros, 59, 63, 69, 473
limpeza, 132, 167, 386
Lottman, 143
LWT, 185, 187, 197, 198, 269, 270, 271, 275

M

macadame betuminoso, 194, 195, 352
macadame hidráulico, 352, 353, 357
macadame seco, 353, 357, 358
macromoléculas, 59
macrot textura, 430, 432, 433
maltenos, 27, 30, 68
manutenção, 406, 407, 413, 441
manutenção preventiva, 406, 407, 441
massa específica, 53, 54, 144, 145, 148, 149, 237, 389, 390, 443
massa específica aparente, 146, 207, 208, 209
massa específica efetiva, 146, 211
massa específica máxima medida, 209, 211, 214
massa específica máxima teórica, 209
massa específica real, 145
materiais asfálticos, 10, 352
materiais estabilizados granulometricamente, 358
material de enchimento, 120, 185, 358
matriz pétreas asfáltica, 159, 168
Mecânica dos Pavimentos, 10, 339, 453
megatextura, 430
método Marshall, 205, 217, 227, 228
metodologia MCT, 359, 360, 361
microrrevestimento, 186, 269, 274, 397
microtextura, 430, 431

mistura asfáltica, 26, 157, 205, 373
misturas asfálticas drenantes, 179
módulo complexo, 104, 303, 305, 306
módulo de resiliência, 291, 294, 296, 297, 300, 301, 345, 346, 348, 349
módulo de rigidez, 106
módulo dinâmico, 304, 306
multidistribuidor, 395

O

ondulações transversais, 415
osmometria por pressão de vapor, 28
oxidação, 34, 50

P

panela, 415, 416, 422, 427
parafinas, 33, 58
partículas alongadas e achatadas, 150, 152, 153
PAV, 108
pavimentação, 10, 20, 25, 373, 403
pavimentos asfálticos, 9, 10, 337, 338, 365, 366, 367, 368, 441
pavimentos de concreto de cimento Portland, 9, 338
pavimentos flexíveis, 337, 415
pavimentos rígidos, 337
pedregulhos, 115, 116
pedreira, 124, 126
peneiramento, 88, 121, 122, 125
peneiras, dimensões, 122
penetração, 10, 42, 43, 55, 56, 58, 194, 343, 393, 443
penetrômetro de cone dinâmico, 345
percolação, 159, 165
perda ao choque, 137, 138
perda por umidade induzida, 328
perfilômetro, 408, 409
permeabilidade, 165, 166, 183
petróleo, 25, 33, 96
PG, 101, 102, 103, 259, 260
pH, 86, 92
pintura de ligação, 414, 420, 422

plastômeros, 65, 68
PMF, 183, 184, 253, 255
pó, 65, 76, 120, 132, 195, 198, 380
pó de pedra, 120, 184, 274
polimento, 117, 421, 433
ponto de amolecimento, 33, 48, 55, 100
ponto de amolecimento anel e bola, 48
pré-misturado, 10, 385, 468, 472
processo estocável, 76
processo seco, 76, 78, 80
processo úmido, 76
produção de asfalto, 27, 35, 36, 37, 38
propriedades físicas, 41, 126, 129

Q

QI, 412, 413
quarteamento, 131, 132
quartzito, 118, 119
quartzito, 117, 118, 119
quociente de irregularidade, 412, 413

R

raio de curvatura, 446, 447, 449, 454
RASf, 37, 178
recapeamento, 441, 468, 469, 470, 471, 472
reciclado, 116, 119, 261, 352, 355
reciclagem, 53, 99, 119, 188, 190, 191, 352, 441, 473, 474
reciclagem em usina, 191
reciclagem *in situ*, 191, 192, 474
reconstrução, 22, 406, 441
recuperação elástica, 69, 70, 71, 78, 79, 80, 300, 472
refino do petróleo, 33, 35, 36, 37, 38, 39
reforço, 9, 337, 339, 342, 352, 365, 424, 441, 453, 468
rejeitos, 352
remendo, 416, 422
reologia, 30, 259
reômetro de cisalhamento dinâmico, 103, 104

reômetro de fluência em viga, 103, 106
reperfilagem, 467, 468
resíduo, 34, 75, 87, 89, 90, 91, 120, 178, 355
resíduo de vácuo, 34, 36
resinas, 28, 30
resistência, 67, 133, 143, 150, 165, 176, 251, 302, 308, 327, 342, 351, 431
resistência à abrasão, 133, 134, 153, 264, 269
resistência à deformação permanente, 67, 150, 165, 179
resistência à fadiga, 67, 179
resistência à tração estática, 249, 288, 308
resistência à tração retida, 251
resistência ao atrito, 119, 140
resistência ao trincamento por fadiga, 178, 315
ressonância nuclear magnética, 28, 72
restauração, 176, 185, 188, 406, 407, 413, 441, 442, 463, 466, 467, 468
retorno elástico, 68, 70, 79
retroanálise, 452, 453, 454, 455, 456, 457
revestimento asfáltico drenante, 165
revestimentos asfálticos, 10, 157, 164, 205, 373, 473
revestimentos delgados, 165, 179, 473
RNM, 28, 72
rochas ígneas, 116, 117, 118
rochas metamórficas, 116
rochas sedimentares, 116
rolagem, 206, 390, 391, 392, 393
rolo compactador, 390, 391, 392, 393
rolos compactadores estáticos, 390
rolos compactadores vibratórios, 391
rolos de pneus, 390
RTFOT, 50, 51, 103, 108
ruído, 165, 172, 179, 435, 436, 437
ruptura da emulsão, 87, 92
RV, 36, 103

S

SAMI, 472
SARA, 27, 28, 29
saturados, 27, 28, 30, 32
Saybolt-Furool, 46, 91, 219
SBR, 66, 92, 94
SBS, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 95
Schellenberg, 252
secador, 377, 378, 379, 380, 383
secador de contrafluxo, 379
secador de fluxo paralelo, 379, 383
segmentos homogêneos, 463, 464, 465, 466
segregação, 120, 123, 130, 172, 386, 393, 423
segurança, 52, 97, 100, 403, 429
selagem de trincas, 466, 467
serventia, 404, 405, 406, 407, 409, 441
SHRP, 32, 100, 102, 120, 123, 150, 229, 230
silos frios, 377, 378
silos quentes, 381, 382
simuladores de laboratório, 317
simuladores de tráfego, 321, 457, 458, 459
sintético, 62, 134
SMA, 161, 168, 169, 170, 171, 172, 249, 250, 251, 252
sol, 30, 31
solo arenoso fino laterítico, 354, 360
solo-agregado, 358, 359
solo-areia, 354, 359
solo-brita descontínuo, 354, 359
solo-cal, 352, 356, 364
solo-cimento, 351, 352, 356, 363, 364
sub-base, 9, 337, 339, 342, 352
Superpave, 100, 103, 229, 232, 233, 236, 259
susceptibilidade térmica, 41, 55, 56

T

tamanho máximo, 120, 131, 230
tamanho nominal máximo, 120, 164

teor de argila, 153
teor de asfalto, 162, 221, 224, 226, 234
teor de parafinas, 33, 58
teor de sílica, 119
termoplásticos, 62, 63, 64
textura superficial, 140, 166, 435
TFOT, 49, 50, 51
tipos de ligantes asfálticos, 40, 41
tipos de modificadores, 65
tipos de rochas, 118
transporte, 11, 12, 14, 18, 20, 384
tratamento superficial duplo, 192, 263, 395
tratamento superficial primário, 193, 195
tratamento superficial simples, 192, 194, 196, 263, 400
tratamento superficial triplo, 192, 263, 395
tratamentos superficiais, 180, 191, 193, 194, 393
triaxial com carregamento repetido, 317, 347, 348
trincamento, 9, 230, 350, 361, 406, 445, 469
trincamento por fadiga, 9, 150, 230, 315
trincas, 311, 354, 356, 415, 417, 418, 425, 467, 469, 472, 473

U

usina asfáltica por batelada, 374, 381, 382
usina contínua, 383
usina de asfalto, 374
usina de produção, 374, 381, 382
usina gravimétrica, 374, 381
usinas asfálticas, 373, 379, 384

V

valor de resistência à derrapagem, 172, 429, 430, 431
valor de serventia atual, 404, 406
vaso de envelhecimento sob pressão, 108
vibroacabadora de esteiras, 388
vibroacabadora de pneus, 387

vibroacabadoras, 387
viga Benkelman, 346, 445, 446,
447, 448, 449
viscosidade absoluta, 44, 45
viscosidade cinemática, 44, 45
viscosidade rotacional, 47
viscosímetro capilar, 44
VPO, 28
VRD, 430, 431

W

WST, 270
WTAT, 187, 197, 199, 269, 270

Z

zona de restrição, 164, 230, 231

ÍNDICE REMISSIVO DAS BIBLIOGRAFIAS

A

- AASHTO (1986), 369
AASHTO (1989) AASHTO T 283/89, 154
AASHTO (1991) AASHTO T85, 154
AASHTO (1993), 438
AASHTO (1997) AASHTO T305, 281
AASHTO (1999) AASHTO T104, 200
AASHTO (1999) AASHTO T209, 281
AASHTO (2000) AASHTO T166, 281
AASHTO (2001) AASHTO D5821, 200
AASHTO (2003) AASHTO T312, 281
AASHTO (2003) AASHTO T319, 281
AASHTO (2005) AASHTO MP8-01, 332
AASHTO PP35, 281
ABEDA (2001), 110
ABINT (2004), 475
ABNT (1989) NBR 6954, 154
ABNT (1991) NBR 12261, 369
ABNT (1991) NBR 12262, 369
ABNT (1991) NBR 12265, 369
ABNT (1992) NBR 12053, 369
ABNT (1993) NBR 12891, 281
ABNT (1994) NBR 13121, 110
ABNT (1998) NBR 6576, 110
ABNT (1998) NBR 9619, 110
ABNT (1999) NBR 14249, 110
ABNT (1999) NBR 14393, 110
ABNT (1999) NBR 6299, 110
ABNT (2000) NBR 14491, 110
ABNT (2000) NBR 14594, 110
ABNT (2000) NBR 6302, 110
ABNT (2000) NBR 6560, 110
ABNT (2000) NBR 6567, 110
ABNT (2000) NBR 6569, 110
ABNT (2000) NBR 6570, 110
ABNT (2001) NBR 14736, 111
ABNT (2001) NBR 14746, 200
ABNT (2001) NBR 5847, 110
ABNT (2001) NBR 6293, 110
ABNT (2001) NBR 6300, 110
ABNT (2003) NBR 6297, 111
ABNT (2003) NBR NM 52, 154
ABNT (2003) NBR NM 53, 154
ABNT (2004) NBR 14896, 111
ABNT (2004) NBR 15087, 281
ABNT (2004) NBR 15115, 369
ABNT (2004) NBR 15140, 281
ABNT (2004) NBR 15166, 111
ABNT (2004) NBR 15184, 111
ABNT (2004) NBR 5765, 111
ABNT (2005) NBR 9935, 154
ABNT (2005) NBR 15235, 111
ABNT (2005) NBR 6568, 111
ABNT NBR 11341, 111
ABNT NBR 11805, 369
ABNT NBR 11806, 369
ABNT NBR 14376, 110
ABNT NBR 14756, 111
ABNT NBR 14757, 200
ABNT NBR 14758, 200
ABNT NBR 14798, 200
ABNT NBR 14841, 200
ABNT NBR 14855, 111
ABNT NBR 14948, 200
ABNT NBR 14949, 200
ABNT NBR 14950, 111
ABNT NBR 6296, 111
ABNT P-MB 326, 110
ABNT P-MB 425/1970, 110
ABNT P-MB 43/1965, 110
ABNT P-MB 581/1971, 110
ABNT P-MB 586/1971, 110
ABNT P-MB 590/1971, 110
ABNT P-MB 609/1971, 110
ABNT P-MB 826/1973, 110
ABNT (2002) NBR 14856, 111
ABPv (1999), 438
Adam, J-P. (1994), 24
AFNOR (1991) AFNOR-NF-P-98-253-1, 332
AFNOR (1991a), 332
AFNOR (1993) AFNOR-NF-P-98-260-1, 332
AIPCR (1999), 200
Albernaz, C.A.V. (1997), 461
Aldigueri, D.R., Silveira, M.A. e Soares, J.B. (2001), 281
Allen, D. H. e Haisler, W. E. (1985), 332
Alvarenga, J.C.A. (2001), 369
Alvarez Neto, L. (1997), 461
Alvarez Neto, L., Bernucci, L.L.B., Nogami, J.S. (1998), 461
Amaral, S.C. (2004), 369
ANP (1993), 281
Antoszczem Jr, J.A. e Massaranduba, J.C.M. (2004), 402
APRG (1997), 281
Aps, M.; Bernucci, L.L.B.; Fabrício, J.M.; Fabrício, J.V.F.; Moura, E. (2004a), 438
Aps, M.; Bernucci, L.L.B.; Fabrício, J.M.; Fabrício, J.V.F. (2004b), 438
Aps, M.; Rodrigues Filho, O.S.; Bernucci, L.L.B.; Quintanilha, J.A. (2003), 438
Asphalt Institute (1989), 154
Asphalt Institute (1995), 154
Asphalt Institute (1998), 402
ASTM (2003b) ASTM E-1960, 438
ASTM (1982) ASTM D4123, 332

- ASTM (1986) ASTM C496, 332
 ASTM (1993) ASTM C 1252, 282
 ASTM (1994) ASTM D5002, 282
 ASTM (1995) ASTM D1856, 282
 ASTM (1997) ASTM D5, 111
 ASTM (1998) ASTM C702, 154
 ASTM (1999) ASTM D4791, 154
 ASTM (2000) ASTM D2041, 282
 ASTM (2000) ASTM D2726, 282
 ASTM (2000) ASTM D 1075-96, 154
 ASTM (2000) ASTM D 4791-99, 282
 ASTM (2000) ASTM D244, 111
 ASTM (2000) ASTM D5840, 111
 ASTM (2000) ASTM D5976, 111
 ASTM (2000) ASTM D6521, 111
 ASTM (2001) ASTM D2042, 111
 ASTM (2001) ASTM D2170, 112
 ASTM (2001) ASTM D2171, 112
 ASTM (2001) ASTM D2172, 282
 ASTM (2001) ASTM D4124, 112
 ASTM (2001) ASTM D5581, 282
 ASTM (2001) ASTM D5801, 112
 ASTM (2001) ASTM D5841, 111
 ASTM (2001) ASTM D6648, 112
 ASTM (2001) ASTM E 965-96, 438
 ASTM (2002) ASTM D 1754/97, 112
 ASTM (2002) ASTM D1188, 282
 ASTM (2002) ASTM D4402, 112
 ASTM (2002) ASTM D6723, 112
 ASTM (2002) ASTM D6816, 112
 ASTM (2003) ASTM D3497-79, 332
 ASTM (2003a) ASTM E 303-93 S, 438
 ASTM (2004) ASTM D2872, 111
 ASTM (2004) ASTM D6084, 112
 ASTM (2004) ASTM D7175, 112
 ASTM (2005) ASTM C 125, 154
 ASTM C127, 154
 ASTM C128, 282
 ASTM D 113, 111
 ASTM D 2007, 111
 ASTM D 270, 111
 ASTM D 36, 111
 ASTM D 5329, 112
 ASTM D 5858, 461
 ASTM D 88, 111
- ASTM D 92, 112
 ASTM D 95, 111
 ASTM D4748-98, 461
 ASTM E102, 112
 ASTM(2002) ASTM D402, 112
- B**
- Balbo, J.T. (1993), 369
 Balbo, J.T. (2000), 332
 Barksdale (1971), 332
 Beligni, M., Villibor, D.F. e Cincere, J.R. (2000), 200
 Bely, L. (2001), 24
 Benevides, S.A.S. (2000), 332
 Benkelman, A.C.; Kingham, R.I. e Fang, H.Y. (1962), 369
 Bernucci, L.L.B. (1995), 369
 Bernucci, L.B.; Leite, L.M. e Moura, E. (2002), 332
 Bertollo, S.A.M. (2003), 112
 Bertollo, S.A.M., Bernucci, L.B., Fernandes, J.L. e Leite, L.M. (2003), 112
 Bittencourt, E.R. (1958), 24
 Bohong, J. (1989), 24
 Bonfim, V. (2000), 200
 Bonnaure, F., Gest, G., Gravois, A. e Uge, P. (1977), 332
 Boscov, M.E.G. (1987), 369
 Bottin Filho, I.A. (1997), 332
 Bottura, E.J. (1998), 438
 Brito, L.A.T (2006), 333
 Brosseau, Y. (2002), 438
 Brosseau, Y. (2002a), 200
 Brosseau, Y. (2002b), 201
 Brosseau, Y., Bogdanski, B., Carre, D., (2003), 201
 Brosseau, Y., Delorme, J-L., Hiernaux, R.(1993), 201
 Buchanan, M.S.; Brown, E.R. (2001), 282
 Bukowski, J.R. (1997), 282
- C**
- Cabral, G.L.L. (2005), 154
 Camacho, J. (2002), 369
 Carey Jr., W.N. e Irick, P.E. (1960), 438
 Carey Jr., W.N.; Huckins, H.C. e Leathers, R.C. (1962), 438
 Carneiro, F.L. (1943), 333
 Carneiro, F.B.L.(1965), 461
 Carpenter, S.H.; K.A. Ghuzlan, e S. Shen (2003) , 333
 Castelo Branco, V.T.F., Aragão, F.T.S. e Soares, J.B. (2004), 282
 Castro Neto, A.M. (1996), 282
 Castro Neto, A.M. (2000), 282
 Castro, C.A.A. (2003), 112
 Centro de Estudios de Carreteras (1986), 333
 Ceratti, J.A.P. (1991), 369
 Chevallier, R. (1976), 24
 Christensen, R.M. (1982), 333
 CNT (2004), 333
 Coelho, W. e Sória, M.H.A. (1992), 282
 COMITEE ON TROPICAL SOILS OF ISSMFE (1985), 369
 Concer (1997), 24
 Cordeiro, W.R. (2006), 201
 Corté, J.-F. (2001), 201
 Costa, C.A. (1986), 201
 Croney, D. (1977), 438
 Cundill, M.A. (1991), 438
- D**
- DAER/RS-EL 108/01, 282
 Dama, M.A. (2003), 112
 Daniel, J.S. e Y.R. Kim (2002), 333
 Daniel, J.S. e Y.R. Kim e Lee, H.J. (1998), 333
 DERBA (1985), 201
 DER-BA ES P 23/00, 201
 DER-PR (1991), 402
 DER-SP (1991), 369
 Dijk, W.V. (1975), 333
 DNC (1993), 112
 DNC 733/1997 (1997), 112
 DNER (1979) DNER PRO-10/79, 461
 DNER (1979) DNER PRO-11/79, 461
 DNER (1985) DNER PRO-159/85, 461

DNER (1994), 112	DNER (1996), 113	DNER (1998), 113, 283
DNER (1994) DNER-ME 138/94, 333	DNER (1996) DNER-ME 193/96, 283	DNER (1998) DNER-ME 035/98, 155
DNER (1994) DNER-IE 006/94, 154	DNER (1996) DNER-PRO 199/96, 155	DNER (1998) DNER-ME 081/98, 155
DNER (1994) DNER-ME 053/94, 154	DNER (1996) DNER-PRO 273/96, 461	DNER (1998) DNER-ME 083/98, 155
DNER (1994) DNER-ME 061/94, 461	DNER (1997), 283, 402	DNER (1998) DNER-ME 096/98, 155
DNER (1994) DNER-ME 063/94, 112	DNER (1997) DNER ME 367/97, 155	DNER (1999) DNER-ES 386/99, 201
DNER (1994) DNER-ME 078/94, 154	DNER (1997) DNER-ES 308/97, 201	DNER (1999) DNER-ES 387/99, 201
DNER (1994) DNER-ME 086/94, 154	DNER (1997) DNER-ES 309/97, 201	DNER (1999) DNER-ES 388/99, 475
DNER (1994) DNER-ME 089/94, 154	DNER (1997) DNER-ES 310/97, 201	DNER (1999) DNER-ES 389/99, 202
DNER (1994) DNER-ME 093/94, 154	DNER (1997) DNER-ES 311/97, 201	DNER (1999) DNER-ES 390/99, 202
DNER (1994) DNER-ME 107/94, 282	DNER (1997) DNER-ES 312/97, 201	DNER (1999) DNER-ME 382/99, 201
DNER (1994) DNER-ME 117/94, 282	DNER (1997) DNER-ES 313/97, 201	DNER (1999) DNER-ME 383/99, 333
DNER (1994) DNER-ME 133/94, 333,	DNER (1997) DNER-ES 314/97, 201	DNER (1999) DNER-ME 397/99, 155
DNER (1994) DNER-ME 222/94, 154	DNER (1997) DNER-ES 317/97, 201	DNER (1999) DNER-ME 398/99, 155
DNER (1994) DNER-ME 24/94, 461	DNER (1997) DNER-ES 318/97, 201	DNER (1999) DNER-ME 399/99, 155
DNER (1994) DNER-PRO 08/94, 438	DNER (1997) DNER-ES 319/97, 201	DNER (1999) DNER-ME 400/99, 155
DNER (1994) DNER-PRO 269/94, 461	DNER (1997) DNER-ES 320/97, 201	DNER (1999) DNER-ME 401/99, 155
DNER (1994a) DNER-PRO 164/94, 438	DNER (1997) DNER-ME 054/97, 155	DNIT (2003) DNIT 005-TER, 439
DNER (1994b) DNER ME 228/94, 370	DNER (1997) DNER-ME 153/97, 283	DNIT (2003) DNIT 006-PRO, 439
DNER (1994b) DNER-PRO 182/94, 438	DNER (1997) DNER-ME 197/97, 155	DNIT (2003c) DNIT 009-PRO, 439
DNER (1994c) DNER ME 256/94, 370	DNER (1997) DNER-PRO 120/97, 155	DNIT (2004) DNIT 031/04-ES, 155
DNER (1994c) DNER-PRO 229/94, 438	DNER (1997c) DNER ES 301/97, 370	DNIT (2005), 155
DNER (1994d) DNER ME 258/94, 370	DNER (1997d) DNER ES 303/97, 370	DNIT (2005) DNIT 034/05-ES, 202
DNER (1995) DNER-EM 035/95, 154	DNER (1997e) DNER ES 304/97, 370	DNIT (2005) DNIT 035/05-ES, 202
DNER (1995) DNER-ME 043/95, 282	DNER (1997f) DNER ES 305/97, 370	DNIT (2006), 370
DNER (1995) DNER-ME 084/95, 155	DNER (1997g) DNER ME 254/97, 370	DNIT(2005) DNIT 032/05-ES, 202

Duque Neto, F.S. (2004), 202
Duque Neto, F.S., Motta, L.M.G. e
Leite, L.F.M. (2004), 202

E

EN 12591 (2000), 113
EN 12593 (2000), 113
EN 12697-5 (2002), 283
Epps, J^a., Sebaaly, P.E., Penaranda, J., Maher, M.R. Mccann, M.B. e Hand, A.J. (2000), 333
Epps, J.A. e C.L. Monismith (1969), 333
Espírito Santo, N.R. e Reis, R.M. (1994), 283

F

Falcão, M.F.B. e Soares, J.B. (2002), 333
Fernandes Jr., J.L. e Barbosa, R.E. (2000), 439
Fernandes, C.G. (2004), 155
Ferry, J.D. (1980), 333
FHWA (1994), 283
FHWA (1995), 283
Finn, F.N., Monismith, C.L. e Makevich, N.J. (1983), 334
Fonseca, O.A. (1995), 334
Fortes, R.M. e Nogami, J.S. (1991), 370
Francken, L.; Eustacchio, E.; Isacson, U e Partl, M.N. (1997), 283
Francken, L. e Partl, M.N. (1996), 334
Fritzen, M.A (2005), 202

G

GEIPOT (1981), 24, 439
Ghuzlan, K.A. e Carpenter, S.H. (2000), 334
Gillespie, T.D.; Sayers, M.W. e Segel, L. (1980), 439
Girdler, R.B. (1965), 113
Godoy, H. (1997), 370
Godoy, H. ; e Bernucci, L.L.B. (2002), 370

Gonçalves, F.P., Ceratti, J.A.P. (1998), 461
Gontijo, P.R.A. (1984), 402
Goodrich, J.L. (1991), 334
Gouveia, L.T. (2002), 155
Guimarães, A.C.R. e Motta, L.M.G. (2000), 155

H

Haas, R. Hudson, W.R e Zaniewski, J. (1994), 439
Hafez, I.H. e Witczak, M.W. (1995), 283
Hagen, V.W. (1955), 24
Harman, T.; Bukowski, J.R.; Moutier, F.; Huber, G.; McGennis, R. (2002), 283
Hawkes, I. e Mellor, M. (1970), 334
Heide J.P.J. e J.C. Nicholls (2003), 283
Henry, J. (2000), 439
Heukelom, W. (1969), 113
Hill, J.F. (1973), 334
Hinrichsen, J. (2001), 283
História das Rodovias (2004), 24
Hondros, G. (1959), 334
Huang, Y.H. (1993), 334
Huang, Y.H. (2003), 461
Hunter, R.N. (2000), 113
Hveem, F. N (1955), 334
Hveem, F. N.; Zube, E.; Bridges, R.; Forsyth, R. (1963), 113

I

IA (Instituto do Asfalto, versão em português) (2001), 113
IBP (1999), 113
Instituto do Asfalto (1989), 283
IPR (1998), 155
ISSA (2001), 202
ISSA (2005), 202
ISSA (2005a), 202
ISSA TB-100 (1990), 284
ISSA TB-109 (1990), 284
ISSA TB-114 (1990), 284
ISSA TB-145 (1989), 283

J

Jackson, N.M. e Czor, L.J. (2003), 284
Jooste, F.J.; A. Taute; B.M.J.A. Verhaeeghe; A.T. Visser e O.A. Myburgh (2000), 284

K

Kandhal, P.S. e Koehler, W.S. (1985), 284
Kandhal, P.S. e Brown, E.R. (1990), 284
Khandal, P. e Foo, K.Y. (1997), 284
Kim, Y.R. e Y.C. Lee (1995), 334
Kim, Y.R., H.J. Lee e D.N. Little (1997), 334
Kim, Y.R.; D.N. Little e F.C. Benson (1990)", 334
Kleyn, E. G. (1975), 370
Klumb, R.H. (1872), 24

L

Lama, R.D. e Vutukuri, V.S. (1978), 334
Láo, V.L.E.S.T. (2004), 439
Láo, V.L.E.S.T. e Motta, L.M.G. (2004), 439
Larsen, J. (1985), 202
LCPC (1976), 113
LCPC (1989), 402
Lee, H.J. e Kim, Y.R. (1998), 334
Leite, L.F.M (1999), 113
Leite, L.F.M (2003), 113
Leite, L.F.M. & Tonial, I.A. (1994), 113
Leite, L.F.M., Silva, P., Edel, G., Motta, L.M. e Nascimento L. (2003), 113
Lentz, R.W. and Baladi, G.Y. (1980), 370
Liberatori, L.A. (2000), 113
Little, D.N.; R.L. Lytton; D. Williams e R.Y. Kim (1999)", 334
Livneh, M (1989), 371
Loureiro, T.G. (2003), 334
Lovato, R.S. (2004), 371
Love, A.E.H. (1944), 334
Luong, M.P. (1990), 334

M

Macêdo, J.A.G. (1996), 462
Magalhães, S.T. (2004), 202
Magalhães, S.T.; Motta, L.M.G e Leite, L.F.M. (2004), 202
Malliagros, T.G. e Ferreira, C.P. (2006), 24
Mamlouk, S.M. e Sarofim, R.T. (1988), 334
Mano (1991), 113
Mano, E.B. (1985), 113
Margary, I. (1973), 24
Marques, G.Lº. e Motta, L.M.G. (2006), 334
Marques, G.L.O. (2001), 155
Marques, G.L.O. (2004), 284
Mascarenhas Neto, J.D. (1790), 24
McDaniel, R. e Anderson, R.M. (2000), 284
McDaniel, R. e Anderson, R.M. (2001), 284
McGennis, R.B.; Anderson, R.M.; Perdomo, D.; Turner, P. (1996), 284
Medina, J e Motta, L.M.G. (2005), 371
Medina, J. (1997), 24
Medina, J., Motta, L.M., Pinto, S. e Leite, L.M. (1992), 335
Metso Minerals (2005), 156
Meurer Filho, E. (2001), 335
Monismith, C.L.; Seed, H.B.; Mitry, F.G.; Chan, C.K. (1967), 371
Moreira, H.S. e Soares, J.B. (2002), 284
Morilha Junior, A. & Trichês, G. (2003), 113
Morilha Júnior, A.(2004), 113
Motta, L.M.G. (1991), 335
Motta, L.M.G. e Leite, L.F.M. (2000), 156
Motta, L.M.G., Tonial, I., Leite, L. F. et al. (1996), 202
Motta, L.M.G.; Medina, J.; Matos, M.V.M.; Vianna, A.A.D. (1990), 371
Motta, L.M.G. (1998), 284
Motta, R.S. (2005), 371
Moura, E. (2001), 335

Mourão, F.A.L. (2003), 202
Mouthrop, J.S. e Ballou, W.R. (1997), 285

N

NAPA (1982), 285
NAPA (1998), 402
NAPA (1999), 203
Nardi, J.V. (1988), 371
Nascimento, L., Leite, L., Campos, E.F., Marques, G. e Motta, L. (2006), 335
Nascimento, L., Leite, L., Láo, V.L.E.S.T e Jesus, G.F. (2005), 439
NCHRP 9-12 (2000), 285
NCHRP-285 (2204), 335
Nóbrega, E.S. (2003), 462
Nóbrega, E.S. e Motta, L.M.G. (2003), 462
Nóbrega, E.S., Motta, L.M.G., Macedo, J.A.G. (2003), 462
Nogami, J.S. e Villibor, D.F. (1981), 371
Nogami, J.S.; Villibor, D.F. (1995), 156
Núñez, W.P. (1997), 371

O

Oda, S. (2000), 113
Oliveira, C.G.M. (2003), 335

P

Papazian, H.S. (1962), 335
Park, S.W. e Kim, Y.R. (1998), 335
Park, S.W., Kim, Y.R. e Schapery, R.A. (1996), 335
Patriota, M.B (2004), 113
Peralta, X., González, J.M., Torres, J. (2000), 203
Phandnavis, D.G. e C.G. Swaminathan (1997), 335
Pinheiro, J.H.M. (2004), 114
Pinheiro, J.H.M. e Soares, J.B. (2004), 114
Pinto, C.S. (2000), 156
Pinto, I.E. (2002), 114

Pinto, S. (1991), 114
Pinto, S. (1996), 285
Pinto, S. (1998), 114
Pinto, S. (2004), 285
Pinto, S. e Preussler, E. (2002), 462
Pinto, S., Guarçoni, D. e Chequer, C.J. (1998), 114
Pinto, S., Preussler, E, e Farah, H. (1983), 114
Porter, O.J. (1950), 371
Prego, A.S.S. (1999), 114
Prego, A.S.S. (2001), 24
Preussler, E.S. (1983), 371
Pronk, A.C. e Hopman, P.C. (1990), 335

Q

Queiroz, C.A.V. (1984), 439

R

Ramos, C.R., Salathé, J.E. e Martinho, F.G. (1993), 114
Ramos, C.R et al (1995). Curso de ligantes asfálticos. IBP, 114
Ribas, M.C. (2003), 24
Ricci, E.; Vasconcelos, J. F.; Kraemer, J.L. (1983), 371
Roberts, A. (1977), 335
Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D-Y. e Kennedy, T.W. (1996), 156
Roberts, F.L.; Mohammad, L.N.; Wang, L.B. (2002), 285
Robinson, R. (1986), 439
Rodrigues, R.M. (1991), 335
Röhm, S.A. (1984), 371
Rowe, G.M. (1993), 335
Ruwer, P., Marcon, G., Morilha J.R.A. e Ceratti, J.A. (2001), 114

S

Santana, H. (1978), 203
Santana, H. (1992), 203
Santana, H. (1993), 335
Santos, C. (2003), 203
Santos, J.D.G. (1998), 371

- Saunier, B.; Dolfus, C. e Geffroy, G. (1936), 24
- Sayers, M.W. e S.M. Karamihas (1998), 439
- Schapery, R.A. (1969), 336
- Schapery, R.A. (1974), 336
- Seed, H.B. and Chan, C.K. (1958), 372
- Seed, H.B.; Chan, C.K.; Lee, C. E. (1962), 372
- Seed, H.B.; Chan, C. K.; Monismith, C.L. (1955), 372
- Seed, H.B.; Mitry, F.G.; Monismith, C.L.; Chan, C.K. (1967), 372
- Serfass, J.P., Bauduin, A., Garnier J.F. (1992), 203
- SETRA e LCPC (1994), 203
- SETRA e LCPC (1998), 203
- SETRA (1997), 203
- Shell (2003), 114
- SHRP (1991), 114
- SHRP (1994a), 285
- SHRP (1994b), 285
- SILVA, P.D.E.A. (2001), 462
- Silva, P.B. (2005), 114
- Silveira, M.A. (1999), 285
- Soares, J.B. (2003) Notas de Aula UFC. Fortaleza – CE, 114
- Soares, J.B., Leite, L.M. Motta, L.M. e Branco, J.V.C. (1999), 285
- Soares, J.B., Motta, L.M. e Soares, R.F. (2000), 285
- Soares, J.B., Motta, L.M., Nóbrega, L.M., Leite, L.M., Paiva, J^{aa}. e Nobre Jr, E.F. (1998), 285
- Solamianian, M., Harvey, J., Tahmoressi, M. e Tandon, V. (2004), 336
- Souza, F.V. (2005), 336
- Souza, F.V. e J. B. Soares (2003a), 336
- Souza, M.L. (1966), 372
- Souza, M.L. (1979), 372
- Souza, M.L. (1980), 372
- Souza, M.L.; Magalhães, J.P.; Silva, R.B.; Schlosser, R. (1977), 372
- Souza, R.O. (2002), 439
- Specht, L.P. (2004), 114
- Suzuki, C.Y. (1992), 372
- T**
- Taira, C. e Fabbri, G.T.P. (2001), 336
- Tayebali, A.A.; J.A. Deacon; J.S. Coplantz e C.L. Monismith (1993), 336
- Thuler, R.B. (2005), 203
- Timoshenko, S.P. e Goodier, J.N. (1951), 336
- Tonial, I.A. (2001), 114
- Tonial, I.A. e Bastos, A.C.R. (1995), 114
- Trichês, G. e Cardoso, A.B. (1999), 372
- Trichês, G.; Cardoso, A. B. (2001), 462
- Trichês, G.; Fontes, L.P.T.L.; Dal Pai, C.M. (2004), 462
- Tuchumantel Jr., O. (1990), 285
- V**
- Valkering, C.P., Lancon, D.J.L., Hilster, E.D. e Stoker, D.A. (1990), 336
- Vaniscotte, J.C. e Duff, M. (1978a), 285
- Vaniscotte, J.C. e Duff, M. (1978b), 285
- Vasconcelos, K.L. (2004), 285
- Vasconcelos, K.L., Soares, J.B. e Leite, L.M. (2003), 286
- Vertamatti, E. (1988), 372
- Viana, A.D. (2004), 336
- Villela e Marcon, (2001), 462
- Villibor, D.F. (1981), 372
- Von Quintus, H.L., J.A. Scherocman, C.S. Hughes e T.W. Kennedy (1991), 336
- W**
- Wang, J.N.; Kennedy, T.W. e McGennis, R.B. (2000), 286
- WAPA (2004), 156
- White, T.D. (1985), 286
- Whiteoak (1980), 286
- Whiteoak, D. (1990), 114
- Wild, O. (1992), 24
- Witczak, M.W. e Root, R.E. (1974), 336
- Woods, K.B. (1960), 156
- World Bank (1985), 439
- World Bank (2000), 439
- Y**
- Yen T. F (1991), 114
- Yildirim, Y.; Solaimanian, M.; McGennis, R.B. e Kennedy, T.W. (2000), 286
- Yoder, E. J. e Witczak, M.W. (1975), 336
- Zhang, W.; A. Drescher e D.E. Newcomb (1997), 336
- ZTV Asphalt (2001), 203

realização



PETROBRAS

ASFALTOS



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS
DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS

