



# 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
<b>1 Introdução</b>	<b>9</b>
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
<b>2 Ligantes asfálticos</b>	<b>25</b>
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
<b>3 Agregados</b>	<b>115</b>
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

<b>4</b>	<b>Tipos de revestimentos asfálticos</b>	<b>157</b>
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
<b>5</b>	<b>Dosagem de diferentes tipos de revestimento</b>	<b>205</b>
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
<b>6</b>	<b>Propriedades mecânicas das misturas asfálticas</b>	<b>287</b>
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
<b>7</b>	<b>Materiais e estruturas de pavimentos asfálticos</b>	<b>337</b>
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
<b>8</b>	<b>Técnicas executivas de revestimentos asfálticos</b>	<b>373</b>
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
<b>9</b>	<b>Diagnóstico de defeitos, avaliação funcional e de aderência</b>	<b>403</b>
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
<b>10</b>	<b>Avaliação estrutural de pavimentos asfálticos</b>	<b>441</b>
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
<b>11</b>	<b>Técnicas de restauração asfáltica</b>	<b>463</b>
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.

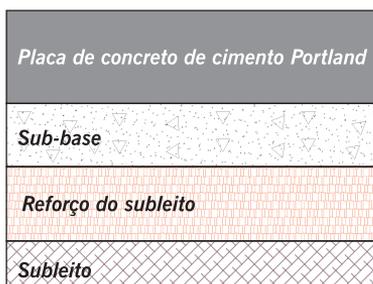
# Materiais e estruturas de pavimentos asfálticos

## 7.1 INTRODUÇÃO

As estruturas de pavimentos são sistemas de camadas assentes sobre uma fundação chamada subleito. O comportamento estrutural depende da espessura de cada uma das camadas, da rigidez destas e do subleito, bem como da interação entre as diferentes camadas do pavimento. A engenharia rodoviária subdivide as estruturas de pavimentos segundo a rigidez do conjunto: em um extremo, têm-se as estruturas rígidas e, no outro, as flexíveis.

Os pavimentos rígidos, em geral associados aos de concreto de cimento Portland, são compostos por uma camada superficial de concreto de cimento Portland (em geral placas, armadas ou não), apoiada geralmente sobre uma camada de material granular ou de material estabilizado com cimento (chamada sub-base), assentada sobre o subleito ou sobre um reforço do subleito quando necessário. A Figura 7.1 mostra uma estrutura-tipo de pavimento de concreto de cimento Portland e uma foto de uma execução das placas de concreto de cimento.

Os pavimentos flexíveis, em geral associados aos pavimentos asfálticos, são compostos por camada superficial asfáltica (revestimento), apoiada sobre camadas de base, de sub-base e de reforço do subleito, constituídas por materiais granulares, solos ou misturas

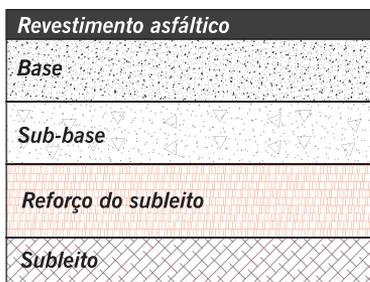


(a) Estrutura de pavimento-tipo



(b) Revestimento em concreto de cimento Portland sendo executado

Figura 7.1 Pavimento de concreto de cimento Portland



(a) Estrutura de pavimento-tipo



(b) Revestimento asfáltico sendo executado

**Figura 7.2 Pavimento asfáltico**

de solos, sem adição de agentes cimentantes. Dependendo do volume de tráfego, da capacidade de suporte do subleito, da rigidez e espessura das camadas, e condições ambientais, uma ou mais camadas podem ser suprimidas. A Figura 7.2 mostra uma estrutura-tipo e a foto de uma execução de pavimento asfáltico.

Os revestimentos das estruturas de pavimento em geral são submetidos a esforços de compressão e de tração devidos à flexão, ficando as demais camadas submetidas principalmente à compressão. Em certos casos, uma camada subjacente ao revestimento pode ser composta por materiais estabilizados quimicamente de modo a proporcionar coesão e aumentar sua rigidez, podendo resistir a esforços de tração. Embora possuam coesão, as camadas de solos finos apresentam baixa resistência à tração, diferentemente dos materiais estabilizados quimicamente.

Diversos autores têm empregado a terminologia de pavimentos semi-rígidos para aqueles com revestimentos asfálticos que possuam em sua base ou sub-base materiais cimentados, que também são solicitados à tração.

No caso de pavimentos de concreto de cimento Portland, devido à elevada rigidez do revestimento em relação às demais camadas, as cargas de superfície são distribuídas por uma grande área em relação à área de contato pneu-pavimento, aliviando dessa forma as tensões transmitidas às camadas subjacentes. Nos pavimentos asfálticos, a razão da rigidez do revestimento em relação às demais camadas granulares não é tão elevada como no caso do revestimento de concreto de cimento Portland, fazendo com que as tensões sejam compartilhadas entre as diversas camadas, proporcionalmente à rigidez (material e geometria). Neste caso as cargas de superfície são distribuídas numa área mais restrita.

O pavimento deve ser dimensionado para o tráfego previsto no período de projeto e para as condições climáticas a que estará sujeito. As diferentes camadas devem resistir aos esforços solicitantes e transferi-los, por sua vez, às camadas subjacentes. As tensões e deformações as quais a estrutura está sujeita dependem principalmente da espessura das camadas e da rigidez dos materiais. Se a estrutura estiver bem projetada para as cargas que atuarão e bem construída, essas cargas gerarão deslocamentos que não pro-

vocam ruptura ou deformação excessiva após uma única passada de roda ou algumas poucas solicitações.

As estruturas de pavimento são projetadas para resistirem a numerosas solicitações de carga, dentro do período de projeto, sem que ocorram danos estruturais fora do aceitável e previsto. Os principais danos considerados são a deformação permanente e a fadiga. Para se dimensionar adequadamente uma estrutura de pavimento, deve-se conhecer bem as propriedades dos materiais que a compõem, sua resistência à ruptura, permeabilidade e deformabilidade, frente à repetição de carga e ao efeito do clima.

A mecânica dos pavimentos é a disciplina da engenharia civil que trata dessa forma de entendimento do pavimento como um sistema em camadas no qual devem estar compatibilizadas as tensões e deslocamentos solicitantes com as propriedades dos materiais e espessuras das camadas. Esses conceitos devem ser utilizados no dimensionamento da estrutura e condicionam a escolha dos materiais (Medina e Motta, 2005).

## **7.2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE BASE, SUB-BASE E REFORÇO DO SUBLEITO**

Para os materiais de base, sub-base e reforço do subleito, empregam-se métodos de seleção e de caracterização de propriedades. A seleção é uma etapa preliminar que consiste em averiguar os materiais disponíveis quanto às características de natureza para serem empregados na estrutura dos pavimentos. As características de natureza interferem nas propriedades geotécnicas no estado compactado. De maneira geral, os materiais de pavimentação compactados devem apresentar-se resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com sua função na estrutura.

Os materiais são basicamente constituídos por agregados, solos e, eventualmente, aditivos como cimento, cal, emulsão asfáltica, entre outros.

### **7.2.1 Métodos de seleção de materiais para base, sub-base e reforço do subleito**

Para a seleção e a caracterização dos agregados, emprega-se tecnologia tradicional, pautada principalmente na distribuição granulométrica e na resistência, forma e durabilidade dos grãos. Para os materiais constituídos essencialmente de agregados graúdos e de agregados miúdos, prevalecem as propriedades dessas frações granulares. As propriedades e os métodos de caracterização dos materiais granulares foram apresentados no Capítulo 3.

Para os materiais granulares com presença de frações mais finas, passantes na peneira N<sup>o</sup> 200, costuma-se tradicionalmente limitar a porcentagem e a atividade dessas frações de solo para uso como materiais de construção de pavimentos. A limitação dos finos, feita em geral pela plasticidade, advém do fato que, na tradição rodoviária européia e norte-americana, na maior parte das vezes esses finos reduzem a permeabilidade dos materiais e sua rigidez, aumentam sua deformabilidade e, principalmente, aumentam a

expansão volumétrica em presença de água, o que causa também uma redução da sua resistência. Mas, essas características indesejadas dos finos podem não ser observadas em solos tropicais, cuja natureza, estrutura e propriedades mecânicas podem diferir substancialmente dos solos finos que ocorrem nas regiões de clima frio e temperado, locais onde a maior parte da tecnologia de pavimentação foi concebida e desenvolvida.

Com o desenvolvimento dos países de clima tropical, notoriamente com a construção de obras geotécnicas de vulto, como estradas, barragens, aterros etc., observou-se uma incongruência entre as propriedades esperadas dos solos finos e as que realmente eles exibiam. Conceitos de geologia e pedologia passaram a ser importantes para a geotecnia no sentido de se compreender o mecanismo diferenciador na formação dos solos existentes nas regiões tropicais e sua influência no comportamento geotécnico. Já em 1947, o professor Milton Vargas, grande geotécnico brasileiro, alertou o professor Casagrande, engenheiro de renome internacional da Mecânica dos Solos e responsável pela concepção da Classificação Unificada de Solos, do problema da classificação em relação aos solos tropicais lateríticos; propôs uma classe exclusiva de argilas K para as caulínicas, importante argilo-mineral presente nos solos lateríticos, por estas exibirem comportamento diferenciado dos demais solos.

A prática da engenharia mostrou que as técnicas tradicionais de classificação e hierarquização aplicadas aos solos tropicais lateríticos e saprolíticos eram ineficientes e inadequadas, pois não inferiam corretamente as propriedades mecânicas. Os professores Nogami e Villibor, engenheiros do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo e professores da Universidade de São Paulo, publicaram em 1981 uma classificação de solos aplicável a solos tropicais para obras viárias. A classificação tem como finalidade principal separar solos de comportamento laterítico (representados pela letra L) daqueles de comportamento não-laterítico (representados pela letra N), uma vez que os lateríticos exibem propriedades peculiares como elevada resistência, baixa expansibilidade apesar de serem plásticos, e baixa deformabilidade. A classificação é conhecida por MCT (Miniatura Compactada Tropical) e foi concebida para solos que passam integralmente ou em grande porcentagem na peneira N<sup>o</sup> 10 (2,00mm) – Nogami e Villibor, 1981; 1995. A Figura 7.3 mostra a classificação de solos tropicais MCT e seus 7 grupos, sendo três de comportamento laterítico L e quatro de comportamento não-laterítico N. A Tabela 7.1 mostra as aplicações de cada tipo de grupo de solo na construção viária. Recomendam-se as fontes bibliográficas citadas para a compreensão dos princípios da classificação e dos métodos de ensaio empregados.

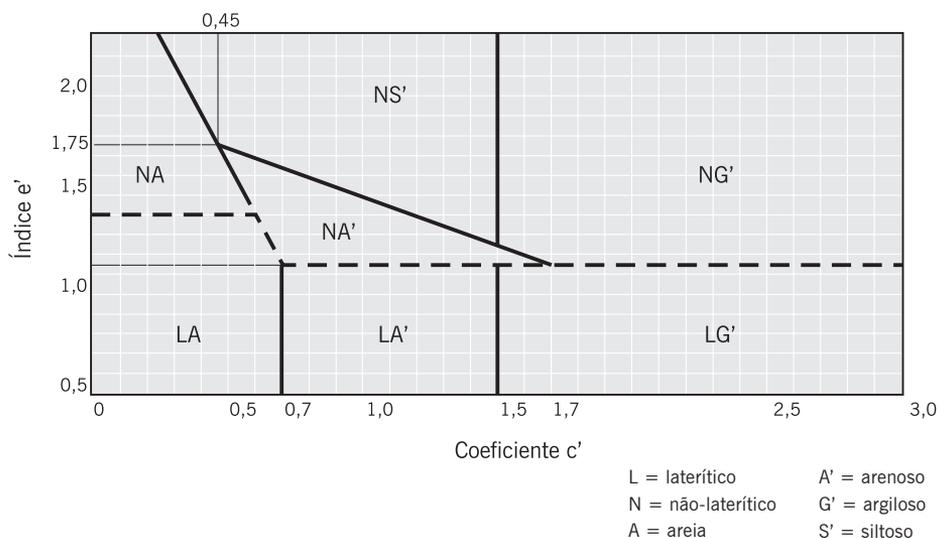


Figura 7.3 Classificação MCT (Nogami e Villibor, 1981)

TABELA 7.1 EMPREGO RECOMENDADO DE SOLOS TROPICAIS EM OBRAS VIÁRIAS (modificado de Nogami e Villibor, 1995)

Comportamento	N = não-laterítico				L = laterítico		
	NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
Recomendação de utilização em obras viárias							
Base de pavimento de vias de baixo volume de tráfego	NR	4°	NR	NR	2°	1°	3°
Reforço do subleito	4°	5°	NR	NR	2°	1°	3°
Subleito compactado	4°	5°	7°	6°	2°	1°	3°
Corpo de aterro compactado	4°	5°	6°	7°	2°	1°	3°
Camada de proteção à erosão	NR	3°	NR	NR	NR	2°	1°
Revestimento primário	5°	3°	NR	NR	4°	1°	2°
Granulometrias típicas	Argilas Siltes	Areias siltosas	Siltes Siltes arenosos	Argilas Argilas arenosas Argilas siltosas Siltes argilosos	Areias siltosas	Areias argilosas	Argilas arenosas Argilas siltosas Siltes argilosos
Grupos prováveis das classificações tradicionais de solos							
Classificação Unificada de Solos	SP SM	MS SC ML	SM CL ML MH	MH CH	SP SC	SC	MH ML CH
Classificação Rodoviária	A-2	A- A-4 A-7	A-4 A-5 A-7-5	A-6 A-7-5 A-7-6	A-2	A-2 A-4	A-6 A-7-5

NR: não recomendado

Os materiais de base, sub-base e reforço do subleito serão descritos sucintamente no item 7.3, onde são fornecidos, segundo as especificações vigentes, os requisitos básicos para cada uma das características, respeitadas as especificidades de cada material pela sua natureza e tipo de aplicação.

### **7.2.2 Propriedades mecânicas dos materiais de base, sub-base e reforço do subleito**

Para o dimensionamento de estruturas de pavimentos, utilizam-se no país principalmente dois parâmetros de caracterização mecânica, quais sejam, (i) Índice de Suporte Califórnia (ISC), usado no dimensionamento convencional do DNER (Souza, 1979); e (ii) Módulo de Resiliência (MR) usado na Mecânica dos Pavimentos. Os ensaios relativos a esses dois parâmetros são brevemente apresentados a seguir, devendo o leitor buscar maiores detalhes na vasta literatura existente, sendo indicados Souza (1980), DNER (1996), Medina e Motta (2005), e DNIT (2006).

#### **Índice de Suporte Califórnia (*California Bearing Ratio*)**

O ensaio para a determinação do Índice de Suporte Califórnia, com abreviatura de ISC em português e CBR em inglês, foi concebido no final da década de 1920 para avaliar o potencial de ruptura do subleito, uma vez que era o defeito mais freqüentemente observado nas rodovias do estado da Califórnia naquele período (Porter, 1950). O ensaio foi concebido, portanto, para avaliar a resistência do material frente a deslocamentos significativos, sendo obtida por meio de ensaio penetrométrico em laboratório.

Foram selecionados os melhores materiais granulares de bases de pavimentos com bom desempenho à época da pesquisa de campo californiana e a média de resistência à penetração no ensaio ISC foi estabelecida como sendo o valor de referência ou padrão, equivalente a 100%. Todos os materiais são referenciados por um valor em porcentagem, representando o quão melhor ou pior é sua resistência no ensaio ISC por comparação com aqueles materiais granulares de referência, designados simplifadamente de “material padrão”. Assim, podem ser encontrados valores de ISC bem baixos, da ordem de unidades, a valores acima de 100%. A resistência ou capacidade de suporte ISC foi correlacionada empiricamente com o desempenho das estruturas levando a um método de dimensionamento de pavimentos que fixa espessuras mínimas da estrutura dependendo do índice de suporte do subleito, de modo a limitar tensões e protegê-lo da ruptura. Este método serviu como referencial para o desenvolvimento de outros métodos, como o do Corpo de Engenheiros norte-americano e, mais tarde, o método brasileiro do DNER 1966 (última versão revisada e publicada em 1981).

A resistência no ensaio ISC é uma resposta que combina indiretamente a coesão com o ângulo de atrito do material. O ISC é expresso em porcentagem, sendo definido como a relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo-de-prova de solo ou material granular e a pressão necessária para produzir a mesma penetração no material padrão referencial. O ensaio ISC, cujo procedimento é

regido no Brasil pela norma DNER-ME 049/94, consiste de forma sucinta nas seguintes etapas:

- moldagem do corpo-de-prova: solo ou material passado na peneira  $\frac{3}{4}$ ", compactado na massa específica e umidade de projeto, em um molde cilíndrico de 150mm de diâmetro e 125mm de altura, provido de um anel complementar de extensão com 50mm de altura – Figura 7.4(a);
- imersão do corpo-de-prova: imerge-se o cilindro com a amostra compactada dentro, em um depósito cheio d'água, durante quatro dias. Durante todo o período de imersão é empregada uma sobrecarga-padrão de 10lbs sobre o corpo-de-prova, que corresponde a 2,5 polegadas de espessura de pavimento sobre o material. Fazem-se leituras por meio de um extensômetro, a cada 24 horas, calculando-se a expansão axial do material em relação à altura inicial do corpo-de-prova – Figura 7.4(b);
- penetração do corpo-de-prova: feita através do puncionamento na face superior da amostra por um pistão com aproximadamente 50mm de diâmetro, sob uma velocidade de penetração de 1,25mm/min – Figura 7.4(c). Anotam-se, ou registram-se no caso de equipamento automatizado, as pressões do pistão e os deslocamentos correspondentes, de forma a possibilitar a plotagem de uma curva pressão-penetração, na qual se definem os valores de pressão correspondentes a 2,54mm ( $P_{0,1}$ ) e 5,08mm ( $P_{0,2}$ ). Estas curvas de pressão-penetração devem possuir um primeiro trecho praticamente retilíneo, característico de fase elástica, seguido de um trecho curvo, característico de fase plástica. Inflexão no início da curva tem significado de problemas técnicos de ensaio e essas curvas devem ser corrigidas – sugere-se leitura das referências bibliográficas já mencionadas para esses detalhes de ensaio.



(a) Compactação de corpo-de-prova



(b) Imersão dos corpos-de-prova em água para medida de expansão axial



(c) Ensaio penetrométrico

### Figura 7.4 Etapas do ensaio ISC

(Fotos: Motta, 2005)

O ISC é calculado para as penetrações de 2,54mm e 5,08mm seguindo as expressões:

$$ISC_{0,1''} = \frac{P_{0,1''}}{70} \times 100 \quad (7.1)$$

$$ISC_{0,2''} = \frac{P_{0,2''}}{105} \times 100 \quad (7.2)$$

Onde:

$P_{0,1''}$  = pressão correspondente à penetração de 2,54mm (ou 0,1") em kgf/cm<sup>2</sup>

$P_{0,2''}$  = pressão correspondente à penetração de 5,08mm (ou 0,2") em kgf/cm<sup>2</sup>

Nas expressões 7.1 e 7.2, os valores 70 e 105 correspondem, respectivamente, aos valores de pressão padrão do material de referência à penetração de 0,1" e 0,2". O ISC é o maior valor entre os dois calculados  $ISC_{0,1''}$  e  $ISC_{0,2''}$ .

### Comentários

Solos que apresentam valores significativos de expansão sofrem deformações consideráveis ao serem solicitados. Costuma-se estipular que o valor máximo aceitável de expansão do subleito seja de 2%, medida axialmente, no ensaio ISC; em casos em que a expansão supere este valor, em geral sugere-se troca de solo, ou estabilização do mesmo com cimento ou cal, ou ainda a colocação de uma camada de material pétreo na dimensão de pedras (acima de 60mm), conhecida popularmente como rachão, para aumento do valor de suporte. Para materiais de reforço do subleito, estipula-se em geral 1% como o valor máximo admissível de expansão axial e 0,5% para bases e sub-bases. Deve-se realçar que há uma tendência de aumento de ISC com a diminuição da expansão axial, porém não há uma boa correlação entre esses parâmetros. Por este motivo a expansão é empregada como fator limitante, independente do valor ISC.

É desejável a utilização em pavimentos de um material que não perca consideravelmente sua resistência quando entra em contato com a água. Em outras palavras, é desejável que a diferença entre a capacidade de suporte antes da imersão em água e aquela obtida após imersão em água seja pequena ou muito reduzida.

A condição de "saturação" simulada após quatro dias de imersão em água pode ser excessivamente conservadora para certas situações. Em algumas condições climáticas e hidrológicas brasileiras, os materiais trabalham em umidade de "equilíbrio" abaixo da umidade ótima de compactação (Souza *et al.*, 1977; Ricci *et al.*, 1983; Nogami e Villibor, 1995; Camacho, 2002). Nessas situações é interessante se executar o ensaio ISC como originalmente concebido e também sem a etapa de imersão, com a finalidade de se comparar valores de ISC, propiciando uma melhor análise de valores a se utilizar em projetos ou avaliar riscos.

O ensaio ISC pode ser realizado em campo, empregando um veículo pesado para aplicação de carga sobre o pistão de modo que provoque a sua penetração no material da camada a ser controlada. Esta alternativa é onerosa e relativamente lenta para ser realizada em campo. Outra possibilidade tem sido a retirada de amostra "indeformada"

da camada (ou nas condições de estado de campo), introduzindo-a dentro do cilindro de ISC. É um ensaio delicado e pode provocar alterações indesejáveis e pouco representativas no corpo-de-prova.

É interessante realçar que o ISC obtido em laboratório pode não corresponder ao de campo devido a vários fatores como: diferença na sobrecarga, perda de umidade dos materiais, principalmente de solos etc. Há materiais cuja resistência é bastante dependente da sobrecarga, tal como sua expansão.

Os ensaios penetrométricos consistem na forma mais simplificada de avaliar resistência *in situ*; ensaios com cone sul-africano ou penetrômetro dinâmico de cone (DCP – *dynamic cone penetrometer*) vêm sendo bastante difundidos na pavimentação e empregados como forma de avaliar a resistência e em correlações com o ISC (Kleyn, 1975; Röhm, 1984; Livneh, 1989; Trichês e Cardoso, 1999). Na atualidade, tem sido crescente a utilização de ensaios não-destrutivos em pista, evitando a retirada de materiais ou procedimentos detalhados e lentos de campo (ver Capítulo 10).

Nos Estados Unidos, o ISC foi sendo progressivamente substituído pelo módulo de resiliência, tendo sido este último adotado definitivamente em 1986 para dimensionamento de pavimentos asfálticos pelo guia de projeto norte-americano da American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO. No Brasil, devido à facilidade e baixo custo de equipamentos ISC, é um ensaio ainda muito popular. No entanto, ressalta-se que o modo de ruptura e as condições de deformabilidade implícitas ao ensaio não correspondem ao estado de tensões atuante num pavimento e deve se levar isto em consideração quando se adota este ensaio em dimensionamento de pavimentos.

Tem-se empregado de forma crescente no país o módulo de resiliência de materiais com o objetivo de utilização de métodos mecanístico-empíricos de dimensionamento de pavimentos. Este ensaio é abordado no próximo subitem de forma sucinta.

### **Módulo de resiliência**

O ensaio ISC envolve uma aplicação lenta, por um período de vários minutos, de uma tensão crescente envolvendo grandes deslocamentos. Esse estado de tensões não corresponde ao efeito da ação de cargas repetidas sobre os materiais da estrutura de um pavimento, aplicadas em geral em frações de segundo, correspondentes a cargas em movimento, com intensidades variadas e com diferentes freqüências, proporcionando na maioria das vezes pequenos deslocamentos, bem menores que 0,1 polegada. Solos com mesmo ISC podem apresentar comportamentos diferentes pela ação de cargas repetidas; assim, as correlações entre o ISC e o desempenho do pavimento são apenas aproximadas (Seed *et al.*, 1955).

Devido à importância dos trincamentos e das rupturas por cargas repetidas, em 1938, o laboratório do Departamento de Transportes da Califórnia iniciou uma série de medidas em campo dos deslocamentos verticais dos pavimentos causados pela ação da passagem rápida de cargas de rodas. Essas medidas foram realizadas por meio de aparelhos elétricos colocados dentro dos pavimentos. Esse tipo de deslocamento vertical passou a

ser denominado de deflexão – Capítulo 10. A deflexão é um termo aplicado para movimentos verticais transientes, quando o pavimento está sujeito à carga de rodas (Hveem, 1955). Cessada a ação da carga, a deflexão do pavimento é recuperada rapidamente. O material responde a uma dada sollicitação com um deslocamento. Parcela desse deslocamento é permanente, não-recuperável, e parcela é resiliente, recuperável quando cessa a ação da sollicitação.

Para a medida em laboratório do efeito da aplicação de cargas repetidas nos materiais, Hveem desenvolveu uma primeira versão de equipamento em 1946 (Hveem, 1955). Seed e Fead desenvolveram na década de 1950 um equipamento triaxial dinâmico, que serviu de modelo para os atuais (Monismith *et al.*, 1967).

Para a medida em campo da deflexão, grande simplificação foi alcançada com a concepção de uma viga articulada capaz de medir deslocamentos verticais da ordem de centésimos de milímetro por Benkelman, em 1953, durante a operação da pista experimental da Western Association of State Highway Officials – WASHO (Benkelman *et al.*, 1962; Hveem *et al.*, 1963) – Capítulo 10. Atualmente, existem equipamentos de campo modernos, dinâmicos e rápidos, que melhor simulam a passagem de cargas de rodas, medindo, por impulso ou por propagação de ondas, as deflexões, em vários pontos da bacia de deformações. Esses equipamentos também serão apresentados no Capítulo 10.

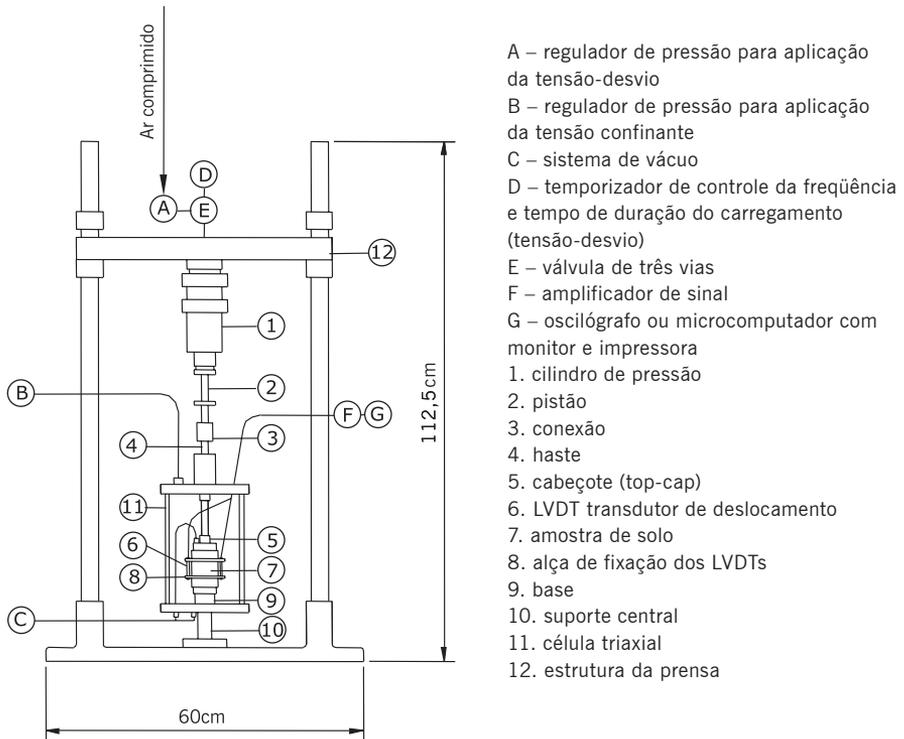
O método de dimensionamento de pavimentos norte-americano estabelecido pela AASHTO na versão de 1986 (com revisão em 1993) substituiu o ISC pelo módulo de resiliência do subleito na expressão do dimensionamento e também considerou esse parâmetro no cálculo dos coeficientes estruturais dos materiais asfálticos. Com isso, o módulo de resiliência foi reconhecido como de grande importância no dimensionamento de estruturas de pavimentos asfálticos. A recomendação de substituir o ISC e outros valores de resistência de materiais pelo módulo de resiliência (MR) foi baseada nas seguintes razões:

- o MR indica uma propriedade básica do material que pode ser utilizada na análise mecânica de sistemas de múltiplas camadas;
- o MR é um método aceito internacionalmente para caracterizar materiais para o projeto de pavimentos e para sua avaliação de desempenho;
- há técnicas disponíveis para estimar o módulo de resiliência em campo com testes rápidos e não-destrutivos, o que facilita a uniformização entre os procedimentos de dimensionamento de pavimentos novos e de reforço de pavimentos antigos.

Para a determinação do módulo de resiliência de materiais de pavimentação, têm-se utilizado equipamentos de carga repetida em laboratório. A Figura 7.5 mostra um exemplo de equipamento triaxial de cargas repetidas e um desenho esquemático da montagem do corpo-de-prova dentro da célula triaxial. Na Figura 7.5(a) mostra-se um esquema do equipamento e seus componentes principais conforme usado em alguns laboratórios do país. Este ensaio é executado desde 1977 na Coppe/UFRJ, que junto com o IPR/DNER implantou a tecnologia dos ensaios de carga repetida para obtenção do MR

de solos e materiais de pavimentação no país (Medina, 1997). Atualmente cerca de 15 laboratórios realizam este ensaio no Brasil e há fabricantes de equipamentos nacionais. A Figura 7.5(b) mostra um exemplo de equipamento de resiliência.

O material a ser ensaiado é compactado nas condições de estado representativas do projeto e obra, com altura de pelo menos duas vezes o diâmetro. Tem-se empregado normalmente corpos-de-prova de 100mm de diâmetro e 200mm de altura para solo,



(a) Esquema do primeiro equipamento triaxial de carga repetida do Brasil (Medina, 1997)



(b) Exemplo de um equipamento atual

Figura 7.5 Esquema e exemplo de equipamento de ensaio triaxial de carga repetida

solo-cimento, misturas solo-agregado etc. e para algumas britas graduadas simples ou tratadas com cimento ou ainda solo-brita-cimento, dependendo do diâmetro máximo dos agregados, devem ser usados corpos-de-prova de 150mm de diâmetro por 300mm de altura.

A aplicação de carga é semi-senoidal por se aproximar da forma de carregamento correspondente à passagem de roda. O tempo de duração de aplicação total de carga é de 0,1 segundo e o repouso de 0,9 segundo. São utilizadas diferentes tensões de confinamento  $\sigma_3$ , dada por pressão de ar dentro da célula, e tensões solicitantes  $\sigma_1$ , aplicadas por célula de carga. A Figura 7.6(a) mostra de forma esquemática as tensões aplicadas ao corpo-de-prova no carregamento; no repouso, restam apenas as tensões de confinamento, sendo retirada a tensão desvio  $\sigma_d$ , que é a diferença entre as tensões principais maior e menor, respectivamente representadas por  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ . Uma combinação variada de tensões é normalmente aplicada. A Figura 7.6(b) representa os deslocamentos do corpo-de-prova durante ciclos de repetição de carga. Uma parcela é deslocamento recuperável e a outra é acumulada ou permanente. É desejável que os deslocamentos permanentes sejam de pequena magnitude. Os deslocamentos são medidos por transdutores mecânicos eletromagnéticos (*linear variable differential transducers, LVDT*), ao longo de uma determinada altura ou espessura (L) do corpo-de-prova.

Módulo de resiliência (MR) em MPa é o módulo elástico obtido em ensaio triaxial de carga repetida cuja definição é dada pela expressão:

$$MR = \sigma_d / \varepsilon_r \quad (7.3)$$

Onde:

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 =$  tensão desvio aplicada repetidamente no eixo axial, conforme indicado na Figura 7.6, MPa;

$\sigma_1 =$  tensão principal maior, MPa;

$\sigma_3 =$  tensão principal menor ou tensão de confinamento, MPa;

$\varepsilon_r =$  deformação específica axial resiliente (recuperável), mm/mm;

Sendo:

$\varepsilon_r = \delta_r / L$ , ou seja, deslocamento recuperável ( $\delta_r$ ) pela altura ou espessura (L) do corpo-de-prova submetida às tensões.

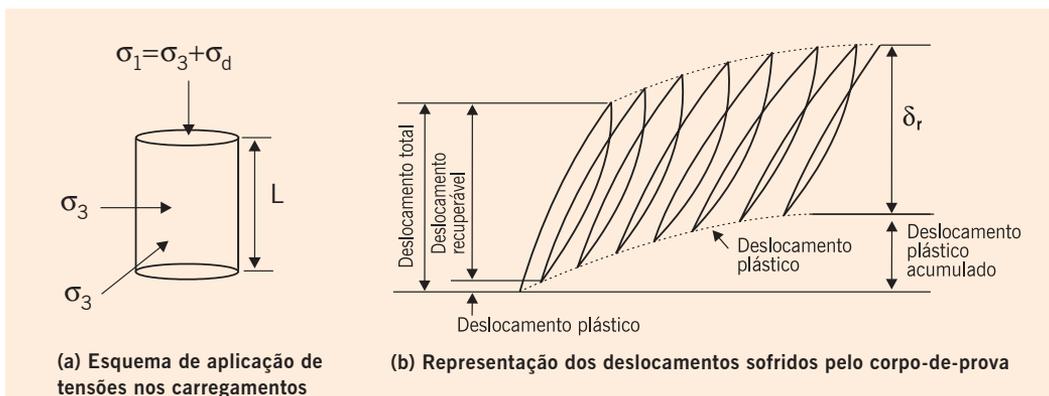


Figura 7.6 Tensões aplicadas e deslocamentos no ensaio de carga repetida

O MR é usado como entrada de dados para o cálculo de tensões e deformações nos diferentes pontos do pavimento. Ressalta-se que os materiais de pavimentação não são elásticos, sendo o uso da teoria da elasticidade uma aproximação. Apesar de dependente do tempo e da história de tensões, o comportamento de alguns materiais de pavimentação pode ser aproximado como elástico não-linear. Para os solos coesivos, a deformação resiliente axial depende consideravelmente da tensão-desvio aplicada. O módulo de resiliência varia significativamente para baixas tensões-desvio, diminuindo sensivelmente essa variação para maiores tensões-desvio – Figura 7.7. Portanto, o solo coesivo no subleito, onde as tensões advindas das cargas de rodas já estão bastante reduzidas, apresenta o módulo de resiliência significativamente maior que aquele observado se o material fosse empregado como base de pavimento. Embora o solo possa ser homogêneo, o módulo de resiliência aumentará com a profundidade, pois as tensões-desvio diminuem (Seed *et al.*, 1963). Para os solos granulares, o módulo de resiliência aumenta com a tensão de confinamento e varia muito pouco com a tensão-desvio – Figura 7.7. Para níveis mais altos de tensão-desvio e baixas tensões de confinamento, a deformação permanente passa a ser excessiva (Seed *et al.*, 1967; Lentz e Baladi, 1980).

Além dos comportamentos tipicamente granular e coesivo, há solos que dependem tanto da tensão de confinamento como da tensão-desvio – Figura 7.8, classificando-os como de comportamento combinado, ou ainda como os solos areno-argilosos (Motta *et al.*, 1990). Observe-se ainda que para os materiais estabilizados com porcentagens significativas de cimento ou cal, devido à cimentação das partículas, o módulo de resiliência tende a ser constante, independente da tensão-desvio e da tensão de confinamento – Figura 7.8.

Os solos podem apresentar variações do módulo de resiliência dependendo da umidade, da energia e do método de compactação. Além disso, após a compactação, o

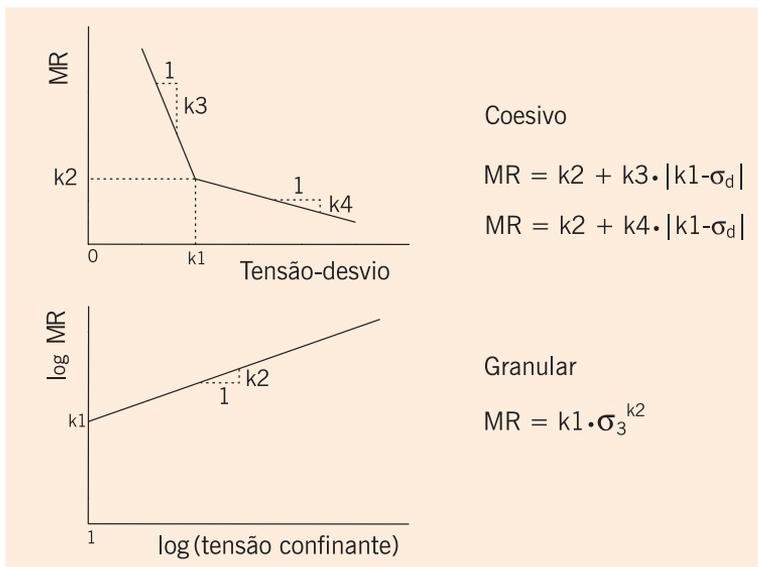


Figura 7.7 Modelos clássicos de comportamento resiliente de solos

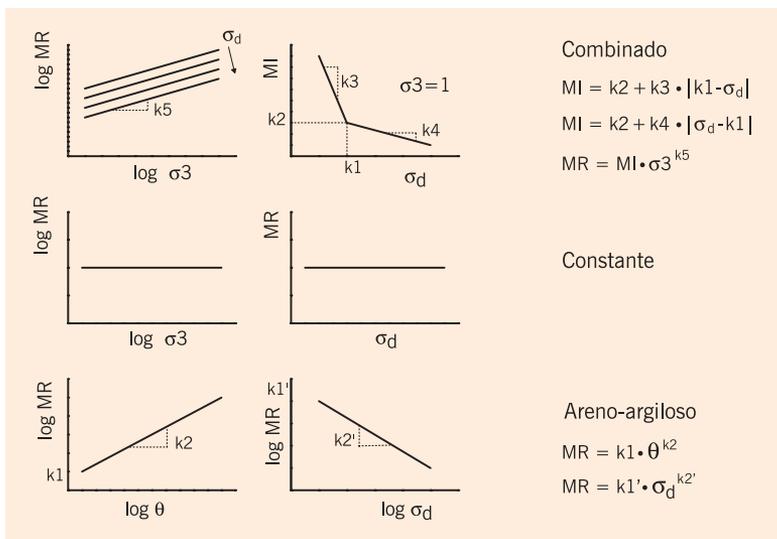


Figura 7.8 Outros comportamentos de solos quanto à resiliência

estado do solo na estrutura do pavimento pode variar com as condições climáticas e hidrológicas. A deformação resiliente cresce sensivelmente nos solos compactados no ramo úmido em relação àqueles compactados no ramo seco, com a mesma massa específica aparente seca (Preussler, 1983). Trabalhar com a hipótese de altos módulos de resiliência obtidos por compactação do solo no ramo seco pode não ser aconselhável, pois é difícil assegurar que não haverá aumento de umidade do solo durante a vida útil do pavimento. O aumento de umidade pode ocasionar queda significativa no módulo de resiliência. A compactação em umidades baixas é vantajosa se houver concomitantemente um aumento de energia de compactação. Os solos apresentam um aumento significativo do módulo de resiliência com o aumento da energia de compactação (Bernucci, 1995). A perda de umidade das camadas de solo compactado acarreta um aumento de módulo de resiliência; não se pode negligenciar, no entanto, que solos ao perderem umidade podem apresentar trincamento por contração. O trincamento produz uma redução do módulo de resiliência equivalente da camada.

É importante realçar que por vezes na comunidade de pavimentação observa-se uma tendência de se utilizar ensaios mais simples para estimar o valor do módulo de resiliência dos materiais. Os autores desaconselham a utilização de correlações do ISC para estimar o valor de módulo de resiliência uma vez que não há uma relação consistente entre esses parâmetros – o primeiro considera a ruptura do material por deformação permanente excessiva, enquanto o segundo considera baixas deformações elásticas.

### Outros ensaios mecânicos

Deve-se ressaltar que além do Índice de Suporte Califórnia e do módulo de resiliência, alguns outros ensaios são empregados para determinar algumas propriedades mecânicas

de materiais de base, sub-base ou reforço do subleito, especialmente no caso de materiais cimentados quimicamente, abordados no item 7.3 a seguir. Esses ensaios procuram caracterizar principalmente o comportamento dos materiais à tração.

Devido à simplicidade de execução, realizam-se ensaios de resistência à tração por compressão diametral em corpos-de-prova cilíndricos regulares, com diferentes tempos de cura e diferentes teores de cimento ou cal, ou ainda de outros estabilizantes. O procedimento do ensaio propriamente dito é similar ao realizado em corpos-de-prova de misturas asfálticas, apresentado no Capítulo 6. A Figura 7.9(a) apresenta uma amostra de agregado reciclado de construção civil com adição de cimento sendo rompida à tração por compressão diametral.

Outro ensaio bastante difundido para materiais cimentados, incluído nos critérios de especificações, como é o caso de solo-cimento, é a resistência à compressão simples. Esta propriedade é determinada aplicando-se um carregamento crescente de compressão axial, sem tensão de confinamento, em corpos-de-prova cilíndricos, preferencialmente com altura de pelo menos duas vezes seu diâmetro. A Figura 7.9(b) apresenta uma amostra de agregado reciclado de construção civil com adição de cimento sendo rompido por compressão axial simples. Deve-se ainda ressaltar que em alguns casos, como concreto compactado a rolo ou solo-cimento, pode-se determinar a resistência à tração por flexão em vigotas biapoiadas, sofrendo carregamento com um ou dois cutelos, dependendo do tipo de ensaio. Esses ensaios envolvem técnica e procedimentos mais complexos. Ceratti (1991) empregou esses ensaios em pesquisa de solo-cimento e comparou resultados obtidos por diferentes tipos de testes.



(a) Resistência à tração por compressão diametral



(b) Resistência à compressão simples

**Figura 7.9** Outros ensaios de resistência em materiais cimentados

(Fotos: Motta, 2005)

### 7.3 MATERIAIS DE BASE, SUB-BASE E REFORÇO DO SUBLEITO

Apresentam-se neste item de forma sucinta alguns materiais de uso corrente no país que podem constituir as camadas de base, sub-base e reforço do subleito para comporem as estruturas de pavimentos com revestimentos asfálticos. As especificidades de cada um deles e os métodos construtivos devem ser pesquisados nas normas rodoviárias brasileiras ou na ABNT. Esses materiais de base, sub-base e reforço do subleito são ainda classificados segundo seu comportamento frente aos esforços em: materiais granulares e solos, materiais estabilizados quimicamente ou cimentados, e materiais asfálticos.

Entende-se por materiais granulares aqueles que não possuem coesão (a não ser aparente pela sucção) e que não resistem à tração, trabalhando eminentemente aos esforços de compressão. Os solos coesivos resistem à compressão, principalmente, e também à tração de pequena magnitude, graças à coesão dada pela fração fina. Os materiais cimentados são materiais granulares ou solos que recebem adição de cimento, cal ou outro aditivo, de forma a proporcionar um acréscimo significativo de rigidez do material natural e um aumento da resistência à compressão e à tração. Há ainda misturas asfálticas e solo-asfalto que se destinam à camada de base e que poderiam ser classificadas como coesivas. Nesse caso a ligação entre agregados ou partículas é dada pelo ligante asfáltico, sendo a resistência à tração bastante superior aos solos argilosos, e por isso são enquadrados em classe diferente dos solos e dos materiais cimentados.

Os materiais mais empregados em pavimentação da classe dos **granulares e solos** são: brita graduada simples (BGS) e bica ou brita corrida; macadame hidráulico; macadame a seco; misturas estabilizadas granulometricamente (estabilizadas por combinação de materiais para atender certos requisitos ou mecanicamente); solo-agregado; solo natural; solo melhorado com cimento ou cal. Deve-se ressaltar ainda a existência de outros materiais de uso crescente em pavimentação, decorrentes de reutilização e reciclagem: escória de alto-forno; agregado reciclado de resíduo sólido de construção civil e demolições; rejeitos de extração de rochas ornamentais; mistura asfáltica fresada etc.

Os materiais **cimentados** mais freqüentes são: brita graduada tratada com cimento (BGTC); solo-cimento; solo-cal; solo-cal-cimento; concreto rolado (CCR – concreto compactado a rolo).

As misturas **asfálticas** são: solo-asfalto; solo-emulsão; macadame betuminoso e base asfáltica de módulo elevado.

As Figuras 7.10 a 7.13 ilustram os materiais de base, sub-base e reforço do subleito mais comumente empregados nos pavimentos asfálticos do país. Uma descrição sucinta desses materiais encontra-se nos subitens a seguir.



(a) Brita graduada simples



(b) Bica corrida



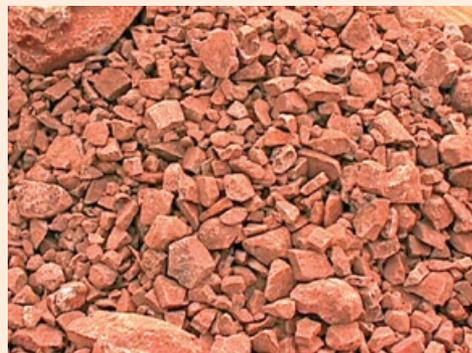
(c) Rachão



(d) Macadame hidráulico  
(Foto: Nogami, década de 1950, Rodovia Presidente Dutra)



(e) Macadame seco



(e) Macadame seco: detalhe da graduação

Figura 7.10 Materiais granulares empregados em bases, sub-bases ou reforços



(a) Solo-brita descontinuo: mistura em pista



(a) Solo-brita descontinuo: detalhe da camada compactada



(a) Solo-brita



(b) Solo-areia: mistura em pista



(c) Solo arenoso fino lateritico LA': trincas devido à perda de umidade da camada compactada



(d) Argila arenosa lateritica LG': trincas devido à perda de umidade da camada compactada

Figura 7.11 Solos e solo-agregados empregados em bases, sub-bases ou reforços



(a) Laterita *in natura*



(b) Saibro: camada compactada



(c) Saibro: detalhe da graduação



(d) Agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil

(Foto: Abdou, 2005)



(e) Agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil: detalhe da natureza e graduação

(Foto: Abdou, 2005)

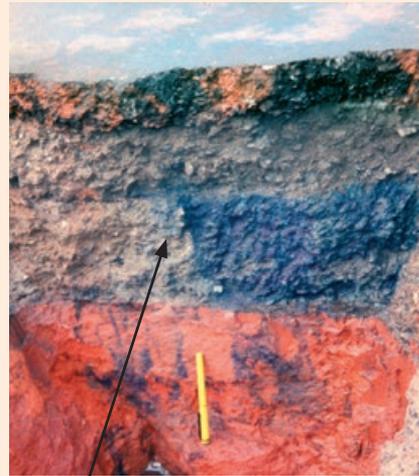


(f) Escória de aciaria

Figura 7.12 Lateritas, saibros e materiais reciclados empregados em bases, sub-bases ou reforços



(a) Brita graduada tratada com cimento



(b) Brita graduada tratada com cimento: camada de sub-base



(c) Solo-cimento



(d) Areia-cal-cinza volante (exposição de bloco como um monumento)



(e) Solo-cal: mistura em pista



(f) Solo-cal: trincas devido à retração

Figura 7.13 Materiais cimentados empregados em bases, sub-bases ou reforços

### 7.3.1 Brita graduada simples

A brita graduada simples é um dos materiais granulares mais largamente utilizados no país como base e sub-base de pavimentos asfálticos e foi introduzida na década de 1960, época em que houve um crescimento expressivo da malha rodoviária pavimentada. Consiste em um material com distribuição granulométrica bem-graduada, com diâmetro máximo dos agregados não excedendo a 38mm e finos entre 3 e 9% (passante na peneira N° 200), que confere um bom intertravamento do esqueleto sólido e uma boa resistência, com ISC normalmente elevado, da ordem de 60% a maiores que 100%. O MR destas bases é em média 100 a 400MPa (1.000 a 4.000kgf/cm<sup>2</sup>), dependendo da graduação, da natureza dos agregados, do estado de compactação e do estado de tensões, principalmente no que se refere à tensão de confinamento.

Os agregados são comumente derivados de rochas britadas e devem tipicamente atender aos seguintes requisitos: sanidade dos agregados graúdos  $\leq 15\%$  e miúdos  $\leq 18\%$ , abrasão Los Angeles LA  $\leq 50\%$  e equivalente areia EA  $> 40\%$  (material passante na peneira N° 4), lamelaridade  $\leq 20\%$  (ABNT, 1991c; 1991f).

Esses materiais são dosados e homogeneizados em usina utilizando água e os agregados atendendo a uma das faixas especificadas por norma. São materiais permeáveis a medianamente permeáveis, utilizados como base ou sub-base em pavimentos asfálticos, sendo também seu uso bastante difundido como sub-base de pavimentos de concreto de cimento.

O transporte é feito em caminhões basculantes e a distribuição do material em pista é feita normalmente por vibroacabadora ou motoniveladora. A compactação é feita por rolos de pneus e/ou lisos, com vibração ou não; esta operação deve ser realizada logo após espalhamento para não perder umidade.

Uma ilustração do material pode ser vista na Figura 7.10(a). A brita ou bica corrida é um material similar, com requisitos menos rigorosos, principalmente granulométricos, podendo ser umedecida em pista – Figura 7.10(b).

Na Figura 7.10 são também apresentados outros materiais granulares descritos a seguir.

### 7.3.2 Macadame hidráulico e macadame seco

O macadame hidráulico foi um dos materiais mais empregados nas primeiras rodovias brasileiras, com base na experiência inglesa de McAdam do início do século XIX. Trata-se de camada granular, composta por agregados graúdos, naturais ou britados, cujos vazios são preenchidos em pista por agregados miúdos e aglutinados pela água, no caso específico do macadame hidráulico. A estabilidade é obtida pela ação mecânica enérgica de compactação. Os agregados graúdos devem ser duros, limpos e duráveis, livres de excesso de partículas lamelares ou alongadas, macias ou de fácil desintegração, sem outras contaminações prejudiciais.

A norma do DNER-ES 316/97 (DNER, 1997a) recomenda três faixas granulométricas, A, B ou C (com agregados máximos passantes da 4", 3" e 2 1/2", respectivamente, e retidos na 3/4", 3/4" e 1/2", respectivamente) e escolhe-se o diâmetro máximo que corresponda a 1/3 a 1/2 da espessura final da camada. Após espalhamento dos agrega-

dos graúdos a camada é compactada com rolo liso de três rodas e rolo liso vibratório até apresentar bom entrosamento. O material de enchimento, que deve seguir as especificações granulométricas, é espalhado através de motoniveladora em quantidade suficiente para encher vazios do agregado graúdo, em uma ou mais vezes, com o auxílio de vassoura, seguida de irrigação e material complementar até obtenção de travamento. A camada deve ser novamente compactada até sua estabilidade.

Dependendo do tipo de subleito, deve-se utilizar uma camada de bloqueio de modo a evitar cravamento do agregado graúdo no solo. O macadame é ainda utilizado, principalmente em obras urbanas, onde não se dispõe de usinas para a brita graduada simples. Devido à granulometria deste material e de seu processo construtivo, a permeabilidade do macadame é maior que a das britas graduadas simples. O controle do processo construtivo pode ser feito visualmente pela movimentação da camada sob efeito dos rolos compactadores ou pela deformabilidade que pode ser medida por meio da viga Benkelman, a ser apresentada no Capítulo 10. Quando os materiais são bem selecionados e o processo construtivo é adequado, o macadame apresenta alta resistência e baixa deformabilidade. A Figura 7.10(d) ilustra o processo construtivo do macadame hidráulico.

O macadame seco é um material granular com muita semelhança ao macadame hidráulico, porém sem uso de água para auxílio do preenchimento dos agregados graúdos pelos miúdos. Em geral, os agregados graúdos são de dimensões bastante significativas, chamadas de “pedra pulmão”, com tamanho variando entre 2” e 5”, de graduação uniforme, e preenchidos por agregados miúdos compreendidos em 5 diferentes faixas. A distribuição e compressão são semelhantes ao macadame hidráulico. As espessuras das camadas acabadas variam entre 12 e 20cm. A Figura 7.10(e) mostra um aspecto deste material.

Valores de módulo de resiliência não podem ser medidos em laboratório para esses tipos de materiais. Porém, podem ser estimados através de retroanálise de bacias de deflexão conforme explicado no Capítulo 10. Exemplos de valores são encontrados em Nuñez (1997).

Em subleitos de baixa capacidade de suporte, emprega-se largamente o “rachão”, material granular de grandes dimensões, denominado “pedras-de-mão”, que, por cravamento e posterior intertravamento, reduz significativamente as deformações permanentes e auxilia na construção das demais camadas subseqüentes por oferecer um aumento substancial de suporte. A Figura 7.10(c) mostra um aspecto deste material.

### **7.3.3 Solo-agregado e materiais estabilizados granulometricamente**

Solos-agregados são misturas naturais ou preparadas de britas, pedregulhos ou areia predominantemente, contendo silte e argila – material natural (solo) que passa na peneira N° 200 (AASHTO M 146-70, 1986). É possível subdividir os solos-agregados em três tipos distintos dependendo da proporção relativa entre a parte graúda e a parte fina – Figura 7.14 (Yoder e Witczak, 1975):

(a) contato grão-grão; baixa densidade, permeável, não suscetível a mudanças com a umidade ou com o congelamento; compactação em geral difícil;

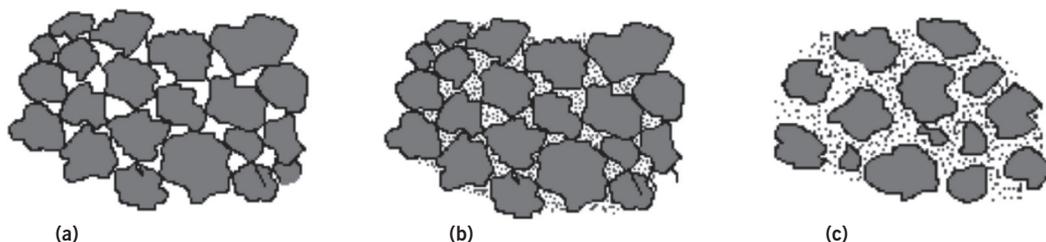


Figura 7.14 Tipos de solo-agregado (Yoder e Witczak, 1975)

- (b) finos preenchem os vazios, proporcionando alta densidade, permeabilidade mais baixa que o do tipo (a), contato grão-grão, mais resistente em geral que o tipo (a), menor deformabilidade; moderadamente difícil de compactar;
- (c) matriz de finos, não se garante contato grão-grão devido ao excesso de finos; densidade mais baixa em geral que o tipo (b), permeabilidade inferior ao tipo (b), podendo ser mesmo impermeável, dependendo da natureza dos finos; a mistura é afetada por variações de umidade; facilidade na compactação.

Para bases de pavimentos, as especificações tradicionais preconizam o uso de materiais do tipo (a) e (b), onde o contato grão-grão seja garantido. As normas ABNT NBR 11805, NBR 12053 e NBR 12265 estabelecem as especificações de uso no país (ABNT, 1991b; 1992a; 1992b). Procura-se tradicionalmente também que fique caracterizada uma distribuição granulométrica bem graduada, com preenchimento dos vazios. Esses materiais são também conhecidos por misturas estabilizadas granulometricamente – DNER-ES 301 e DNER-ES 303 (DNER, 1997c; 1997d). Em geral, as misturas onde o contato grão-grão é garantido são tradicionalmente as preferenciais, embora a prática tenha mostrado grande sucesso no tipo (c), quando certos requisitos, comentados a seguir, são observados. As misturas estabilizadas granulometricamente devem seguir uma faixa granulométrica dada em norma. Modernamente tem-se evitado o uso do termo estabilizar, quando não há adição de estabilizantes do tipo da cal, do cimento etc. Há autores que preferem a designação mais rigorosa “misturas estabilizadas mecanicamente”, para diferenciar da adição de estabilizantes químicos.

Tem-se empregado com frequência misturas do tipo (b) e (c), chamadas de solo-brita ou solo-areia. O tipo (c) tem sido denominado também de solo-brita descontínuo. O importante dessas misturas, principalmente no caso do tipo (c), é a natureza do material fino. Pode-se utilizar com sucesso misturas do tipo (c) com solos lateríticos. Este fato se deve principalmente por: ausência do ciclo gelo-degelo; drenagem favorecida; umidade de equilíbrio abaixo da ótima de compactação em algumas regiões, favorecida pela secagem do material de base; natureza e estado peculiar dos solos lateríticos, que expandem muito pouco em presença de água, apesar de sua plasticidade às vezes elevada.

As misturas tipo (c) devem empregar necessariamente solos de comportamento laterítico, selecionados pela metodologia MCT (Nogami e Villibor, 1995). Essas misturas, por prevalecer a matriz de solo laterítico, são coesivas, muito pouco expansivas e com boa

capacidade de suporte. Certas misturas de solo-brita (50% em peso de brita) dão ISC da ordem de 80% na energia modificada. As misturas com 70% em peso de brita e 30% de solo apresentam muitas vezes ISC acima de 100% e apresentam pouca perda de capacidade de suporte após imersão em água. Os valores de MR são similares aos das britas graduadas simples, podendo ser superiores, ou seja, apresentam menor deformabilidade. Essas misturas podem ser executadas em pista com auxílio de pá-carregadeira, grade de disco e motoniveladora. O material resultante é recomendável como material de base de vias de baixo volume de tráfego. É um excelente material de reforço de subleito em vias de tráfego médio ou mesmo pesado.

Conforme a quantidade de finos, a mistura pode sofrer contração por perda de umidade, e como conseqüência, apresentar fissuração. Esta conseqüência não chega a ser um problema comprometedor desde que a porcentagem em peso de solo nas misturas solo-brita não seja superior a 50% do total. Tem-se procurado evitar agregados maiores que 25mm de diâmetro.

O solo-brita começou a ser empregado no estado de São Paulo ainda na década de 1950, conhecido então por “virado paulista” (Nogami e Villibor, 1995). Somente na década de 1980, o solo laterítico-brita voltou a ser empregado em maior escala, com aplicação estendida também a vias urbanas. Atualmente, tem-se empregado também o solo-brita-cimento, com porcentagem de cimento variando em geral de 3 a 6% em peso. Esse material tem sido empregado como material de base, predominantemente em misturas de 80% brita – 20% solo ou no máximo 70% brita – 30% solo. Eles vêm sendo empregados em vias de tráfego médio a pesado com sucesso. Preferencialmente nesses casos a mistura deve ser feita em usina.

A Figura 7.11(a) ilustra o solo-brita e a Figura 7.11(b) um solo-areia sendo misturado em pista.

#### **7.3.4 Solo arenoso fino laterítico**

O solo arenoso fino laterítico (SAFL) é uma mistura de argila e areia encontrada na natureza ou artificialmente composta por mistura de areia de campo ou rio com argila laterítica. A partir da década de 1970, seu emprego foi mais difundido, chegando hoje, somente no estado de São Paulo, a mais de 8.000km em rodovias de baixo volume de tráfego com a utilização desse material como base. Como reforço do subleito ou como sub-base, pode ser usado em pavimentos para tráfegos médios ou pesados.

A granulometria é em geral descontínua, com ausência ou pequena porcentagem da fração silte. A Tabela 7.2 mostra a graduação recomendada pelo DER-SP (1991). A Tabela 7.3 mostra as exigências com relação às propriedades mecânicas e hidráulicas do solo arenoso fino segundo a mesma especificação para uso como base.

Recomenda-se que se utilize a metodologia MCT (Nogami e Villibor, 1981, 1995; DNER, 1996; DNER-ME 254/97; DNER-ME 256/94; DNER-ME 258/94) para a escolha do material, não sendo necessária a adoção de uma das graduações especificadas na Tabela 7.2. O solo deverá pertencer às classes de comportamento laterítico LA, LA', ou

**TABELA 7.2 FAIXAS A, B, E C DE SOLOS ARENOSOS FINOS LATERÍTCOS PARA BASES E SUB-BASES DE PAVIMENTOS (DER-SP, 1991)**

Peneiras de malhas quadradas	Graduações		
	Porcentagem que passa, em peso		
	A	B	C
2,00mm, N° 10	100	100	100
0,42mm, N° 40	75 – 100	85 – 100	100
0,150mm, N° 100	30 – 50	50 – 65	65 – 95
0,075mm, N° 200	23 – 35	35 – 50	35 – 50

Obs.: A ordem de prioridade na escolha dos solos é na seguinte ordem: faixa A; faixa B e faixa C.

**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)**

Exigências mecânicas e hidráulicas	Valores admissíveis	Método de ensaio
Mini-CBR sem imersão	≥ 40%	DER-ME 192-88
Perda de suporte no mini-CBR por imersão em relação ao mini-CBR sem imersão	≤ 50%	DER-ME 192-88
Expansão com sobrecarga padrão	≤ 0,3%	DER-ME 192-88
Contração	0,1% a 0,5%	DER-ME 193-88
Coeficiente de infiltração	$10^{-2}$ a $10^{-4}$ cm $\sqrt{\text{minuto}}$	DER-ME 194-88

Obs.: A energia de compactação neste caso é a intermediária, e o corpo-de-prova deve estar na umidade ótima e 100% de grau de compactação (DER-ME 191-88).

ainda LG', segundo a classificação MCT. Para uma seleção preliminar de solos, pode-se também empregar método simplificado de identificação de solos tropicais (Fortes e Nougami, 1991; Godoy, 1997; Godoy e Bernucci, 2002). Vertamatti (1988) propõe algumas alterações na metodologia MCT para inclusão de identificação e classificação de solos transicionais, além dos lateríticos e não-lateríticos, com comportamento geotécnico intermediário entre os dois extremos.

As pesquisas têm mostrado que esse material pode apresentar módulos de resiliência de cerca de 100MPa a 500MPa (1.000 a 5.000kgf/cm<sup>2</sup>), ou mesmo superiores, dependendo do tipo de solo laterítico, sendo que os mais argilosos tendem a mostrar módulos menores que os mais arenosos (Bernucci, 1995).

A Figura 7.11(c) ilustra uma camada de base de solo arenoso fino laterítico do tipo LA' compactada e após perda de umidade (observe-se o padrão de trincamento típico dessas camadas) e a Figura 7.11(d) uma camada de solo argiloso laterítico LG', que tende a trincar mais, formando blocos de menores dimensões e abertura de trincas maior. A perda de umidade dessas camadas é um fenômeno bastante conhecido sendo determinante no comportamento desses materiais como camada de pavimento (Villibor, 1981; Camacho, 2002). O trincamento das camadas de solos lateríticos leva a uma redução do módulo de resiliência efetivo, porém ainda são consideradas camadas de baixa deformabilidade e de comportamento mecânico bom a excelente (Bernucci, 1995).

### 7.3.5 Outros materiais granulares e reciclados

Em várias regiões brasileiras há a disponibilidade de lateritas, que são concreções presentes em geral no horizonte superficial B, ocorrendo conjuntamente a solos arenosos e argilosos lateríticos. São materiais com boa capacidade de suporte e que têm sido empregados diretamente como bases, sub-bases ou ainda reforços do subleito. Podem ser caracterizados como solos-britas naturais. Como exemplos de utilização, menciona-se a pavimentação de Brasília à época de sua construção (Prego, 1996) e várias rodovias federais da região Centro-Oeste (Santos, 1998; Motta *et al.*, 1990). Esses materiais são abundantes em certas regiões da Amazônia e sua caracterização é essencial para uso na pavimentação (Vertamatti, 1988); seu emprego pode ser estendido até como agregados de misturas asfálticas, com algumas experiências nas regiões Norte e Centro-Oeste do país (Amaral, 2004). Os valores de módulo de resiliência da laterita podem variar entre 100 a 500MPa, em geral. A Figura 7.12(a) ilustra uma laterita de grandes dimensões.

Em algumas regiões ocorrem saibros que são materiais granulares naturais, com poucos finos, pertencentes ao horizonte C de perfis residuais em geral de granito e gnaiss. Têm sido também largamente empregados como reforços ou sub-bases ou ainda em rodovias de baixo volume de tráfego como material de base. Apesar de apresentarem em geral ISC elevados, podem mostrar elevada deformabilidade, devido à natureza mineralógica, devendo ser empregados com os devidos cuidados nesses casos. As Figuras 7.12(b) e (c) ilustram este material.

O uso de materiais reciclados tem crescido em pavimentação nos últimos anos. Os agregados reciclados de resíduos sólidos de construção civil e de demolição podem ser empregados em reforços do subleito ou sub-bases desde que atendam as especificações da norma ABNT 15115 (2004). Esta especificação permite seu uso como material de base em vias de baixo volume de tráfego. Esse material vem sendo utilizado principalmente em vias urbanas. As Figuras 7.12(d) e (e) ilustram o material sendo distribuído em pista e um detalhe de seus diversos componentes. Trabalhos de pesquisa têm sido dedicados ao uso e avaliação de aplicação em pavimentos (Fernandes, 2004; Motta, 2005).

Outro exemplo de reuso de material que vem sendo explorado nos locais próximos a siderúrgicas são as escórias de alto-forno e as de aciaria. Estes últimos podem ainda ser expansivos dependendo do tempo de estocagem (Alvarenga, 2001). A Figura 7.12(f) mostra um aspecto das escórias de aciaria.

### 7.3.6 Brita graduada tratada com cimento

A brita graduada tratada com cimento (BGTC) tem sido bastante utilizada, principalmente em pavimentos de vias de alto volume de tráfego. No país, seu uso começou a ser mais difundido no final da década de 1970. A BGTC é empregada geralmente como base de pavimentos com revestimentos betuminosos, porém também é empregada como base de pavimentos intertravados ou sub-base de pavimentos de concreto.

A Dersa, no estado de São Paulo, utilizou nas décadas de 1970 e 1980, em vários de seus pavimentos asfálticos semi-rígidos, a BGTC como base. Na década de 1990, pas-

sou a empregar a BGS como base e a BGTC como sub-base em pavimentos asfálticos, denominados neste caso de pavimentos semi-rígidos invertidos ou “estrutura sanduíche”. Como exemplo desta utilização, cita-se a Rodovia Carvalho Pinto – SP, construída no Vale do Paraíba.

Na BGTC, em princípio, usa-se o mesmo material da BGS, porém com adição de cimento na proporção de 3 a 5% em peso (ABNT NBR 12261, 1991d; ABNT NBR 12262, 1991e; DER-SP ET-DE-P00/009/2005). Recomenda-se que seja compactada a pelo menos 95% da energia modificada para aumento de resistência e durabilidade. A BGTC, devido à cura do cimento, apresenta retração, levando ao aparecimento de fissuras e trincas. Estes problemas podem levar à reflexão destas trincas ao revestimento asfáltico no caso do emprego da BGTC como material de base (Balbo, 1993). Este fato foi observado na Rodovia dos Bandeirantes e Rodovia Ayrton Senna da rede Dersa-SP, estando ambas sob concessão. Por este motivo, tem-se empregado com frequência a BGTC em pavimentos semi-rígidos invertidos como material de sub-base para evitar a reflexão das trincas para o revestimento (Suzuki, 1992). A ordem de grandeza do módulo de resiliência da BGTC é de 3000 a 12.000MPa. A Figura 7.13(a) ilustra a BGTC e a Figura 7.13(b) seu uso como sub-base em pavimento semi-rígido invertido.

### **7.3.7 Solo-cimento**

A estabilização química de solos com cimento Portland pode se dar de duas formas distintas a depender do objetivo: (i) no caso de objetivar-se um enrijecimento significativo do solo, empregam-se percentuais em massa em geral acima de 5% e denomina-se esta mistura de solo-cimento (DNER-ES 305 – DNER, 1997f); (ii) no caso de melhoria parcial das propriedades, principalmente trabalhabilidade conjugada com certo aumento de capacidade de suporte, empregam-se percentuais baixos, da ordem de 3%, denominando-se neste caso a mistura de solo melhorado com cimento (DNER-ES 304 – DNER, 1997e).

O solo, para ser estabilizado com cimento de forma econômica, deve ter certa proporção de areia, pois caso tenha um percentual muito alto de argila pode exigir um teor muito elevado de cimento e ficar demasiadamente oneroso, além de apresentar muita retração. A faixa viável é de aproximadamente 5 a 9% de cimento em relação à massa total. O solo-cimento deve ser feito de preferência em usina, mas também pode ser misturado em pista, no caso de vias de baixo volume de tráfego. Deve ser compactado imediatamente após a mistura e a distribuição em pista devido à rapidez da reação de hidratação do cimento.

A base de solo-cimento tem-se mostrado bastante resistente e durável desde que a mistura esteja bem dosada, sejam respeitados os prazos máximos de mistura, espalhamento e compactação, seja minimizada a ocorrência excessiva de trincas por retração, e o subleito tenha boa capacidade de suporte para que o solo-cimento seja compactado de forma eficiente. O tráfego deve ser liberado em geral após 14 dias de cura. O solo-cimento também tem sido utilizado com sucesso como sub-base de pavimentos de concreto de

cimento Portland. Valores de módulo de resiliência de solo-cimento variam de 2.000MPa até mesmo acima de 10.000MPa. A resistência à tração varia entre 0,6 a 2,0MPa, dependendo do teor de cimento e tipo de solo (Ceratti, 1991). A resistência à compressão simples deve atender as especificações mínimas de norma (2,1MPa), mas podem chegar até cerca de 7 a 8MPa, dependendo do teor de cimento e natureza do solo.

O solo-cimento foi largamente empregado na década de 1960 quando as obras de pavimentação se estenderam para regiões com escassez de pedreiras. Atualmente, os órgãos e concessionárias têm voltado a especificar o solo-cimento, mostrando-se novamente como um material para competir com as tradicionais bases granulares de BGS. A Figura 7.13(c) mostra um pavimento com solo-cimento na base.

O solo melhorado por cimento é empregado principalmente para alterar a plasticidade e melhorar a trabalhabilidade de certos solos em pista ou para atender as especificações granulométricas. Adicionalmente, apesar da porcentagem não ultrapassar cerca de 3% em massa, pode haver uma diminuição significativa de deformabilidade e diminuição da expansão em presença de água. Algumas especificações indicam compactação não-imediata após mistura, o que é uma opção questionável (Macedo e Motta, 2006). Nesses casos, o solo melhorado por cimento é deixado em pilhas durante algumas horas ou mesmo dias para ter a agregação, alteração granulométrica e depois a compactação.

### 7.3.8 Solo-cal

A estabilização química de solo com cal segue os mesmos objetivos da mistura com cimento, seja para o enrijecimento, seja para a trabalhabilidade e redução da expansão. O solo-cal, aplicado preferencialmente a solos argilosos e siltosos caulínicos, tem sido utilizado principalmente como reforço de subleito ou sub-base. Alguns experimentos foram feitos empregando-se a mistura como base de pavimentos de baixo volume de tráfego, ora com sucesso, ora não.

O solo-cal tem um período muito maior de cura, comparado ao solo-cimento, para que haja as reações responsáveis pelo aumento de resistência (Bosco, 1987). Algumas tentativas têm sido feitas com misturas solo-cal-cimento, procurando aproveitar de ambos aditivos suas qualidades benéficas. O poder de estabilização da cal varia com sua pureza e origem. As reações rápidas (imediatas) provocam a floculação e permuta iônica, permitindo uma redução da plasticidade, que se traduz em uma melhor trabalhabilidade dos solos, e diminuição da expansibilidade. As reações lentas (ação cimentante) são resultantes das reações pozolânicas e de carbonatação. A cura é altamente influenciada pela temperatura. Em geral utiliza-se cal em teores entre 4 e 10% em massa. As Figuras 7.13(e) e (f) ilustram a aplicação de cal em pista e uma base acabada de solo-cal com cerca de 30 anos em operação (Lovato, 2004).

Algumas experiências de sucesso no Sul do país foram realizadas adicionando-se cal a materiais como areia de duna, conjuntamente com cinza volante como elemento reativo à cal – Figura 7.13(d) (Nardi, 1988).

## 7.4 ALGUMAS ESTRUTURAS TÍPICAS DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Com o objetivo de mostrar algumas soluções típicas de combinações de materiais e de camadas que vêm sendo empregadas em pavimentação asfáltica no país, são apresentadas algumas seções de estruturas de pavimento como ilustração, tanto para tráfego muito pesado como para vias de baixo volume de tráfego. As espessuras das camadas não são apresentadas pois dependem de dimensionamento estrutural que deve ser feito caso a caso. Para isso deve ser empregado de preferência um método de dimensionamento que considere a estrutura do pavimento como um sistema em camadas e que utiliza os dados de módulos de resiliência dos materiais do subleito e das camadas, inclusive do revestimento, para calcular as espessuras necessárias em função do tráfego e do clima. Para maiores informações sobre métodos de dimensionamento empírico e mecanístico-empírico deve-se consultar outros livros tais como Medina e Motta (2005) e o *Manual de Pavimentação* do DNIT (2006).

Não se trata aqui de apresentar um catálogo de estruturas, mas apenas exemplos de uso dos materiais abordados neste capítulo em combinação com alguns tipos de revestimentos asfálticos apresentados no Capítulo 4 – Figuras 7.15 a 7.17. As espessuras das camadas são variáveis e dependem de vários fatores de dimensionamento. Para ilustrar faixas usuais, as espessuras dos revestimentos vão desde alguns milímetros, como os tratamentos superficiais simples, até uma a duas dezenas de centímetros de misturas usinadas; as camadas de base e sub-base podem apresentar espessuras da ordem de uma a três dezenas de centímetros, enquanto o reforço do subleito pode ser de uma a três ou mesmo quatro dezenas de centímetros.

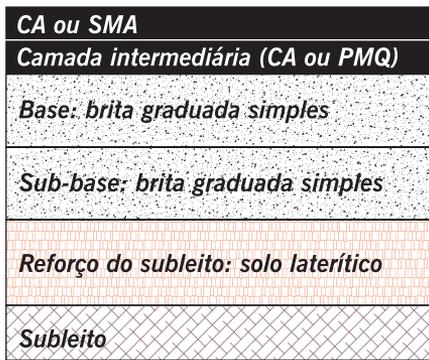
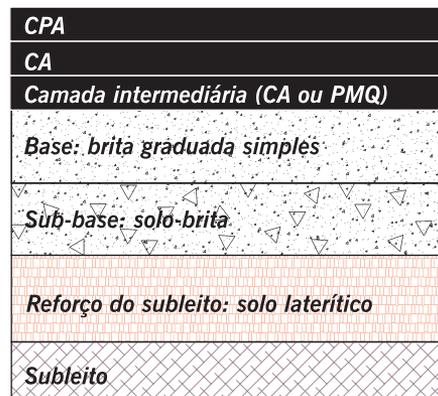
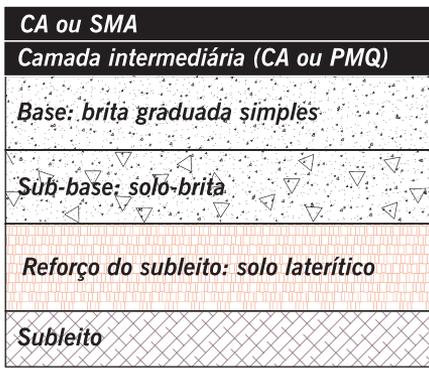


Figura 7.15 Estruturas típicas de pavimentos asfálticos



Figura 7.16 Estruturas típicas de pavimentos asfálticos

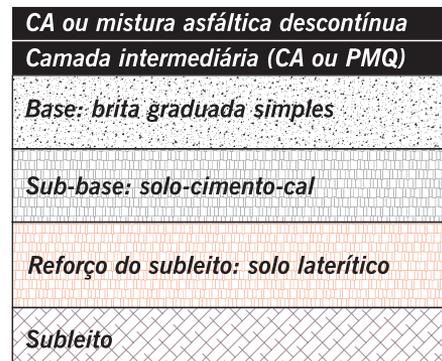
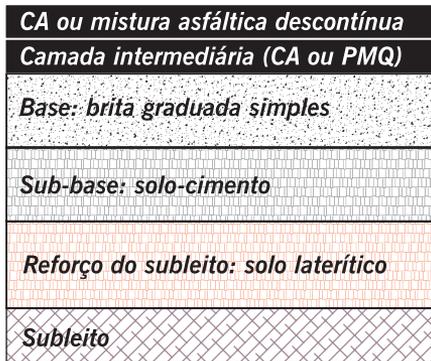
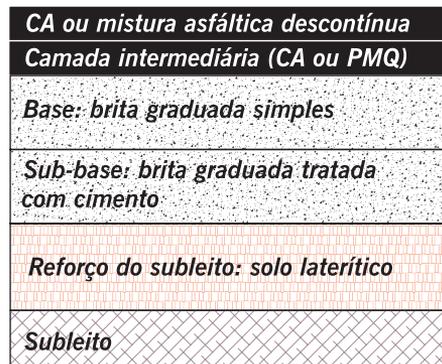


Figura 7.17 Estruturas típicas de pavimentos asfálticos

## BIBLIOGRAFIA CITADA E CONSULTADA

- AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. *AASHTO guide for design of pavement structures*. Washington, USA, 1986.
- \_\_\_\_\_. *AASHTO guide for design of pavement structures*. Washington, USA, 1993.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 1183: *materiais para sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento*. Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_\_. NBR 11805: *materiais para sub-base ou base de solo-brita*. Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_\_. NBR 11806: *materiais para sub-base ou base de brita graduada*. Rio de Janeiro, 1991c.
- \_\_\_\_\_. NBR 12261: *dosagem de brita graduada tratada com cimento*. Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_\_. NBR 12262: *sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento (BGTC)*. Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_\_. NBR 12264: *sub-base ou base de brita graduada*. Rio de Janeiro, 1991f.
- \_\_\_\_\_. NBR 12053: *solo-brita: determinação de dosagem*. Rio de Janeiro, 1992.
- \_\_\_\_\_. NBR 12265: *sub-base ou base de solo-brita*. Rio de Janeiro, 1992.
- \_\_\_\_\_. NBR 15115: *agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: execução de camadas de pavimentação: procedimentos*. Rio de Janeiro, 2004.
- ALVARENGA, J.C.A. *Um estudo de avaliação estrutural e econômica de pavimentos flexíveis de escória de aciaria*. 2001. 143 f. Dissertação (Mestrado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- AMARAL, S.C. *Estudo de misturas laterita-asfalto da região metropolitana de Belém – PA para revestimentos de pavimento*. 2004. 198f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- BALBO, J.T. *Estudo das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação aos pavimentos semi-rígidos*. 1993. 181 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- BENKELMAN, A.C.; KINGHAM, R.I.; FANG, H.Y. Special deflection studies on flexible pavements. The AASHTO Road Test – *Proceedings of a Conference*, St. Louis. *Special Report*, Washington, n. 73, p. 102-125, 1962.
- BERNUCCI, L.L.B. *Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego*. 1995. 237 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- BOSCOV, M.E.G. *Estudo comparativo do comportamento de um solo saprolítico e de um solo laterítico estabilizados com cal*. 1987. 157 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.
- CAMACHO, J. *Peculiaridades de distribuição de umidades em bases de pavimento de solo arenoso fino laterítico*. 2002. 180 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- CERATTI, J.A.P. *Estudo do comportamento a fadiga de solos estabilizados com cimento para utilização em pavimentos*. 1991. Tese (Doutorado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.
- COMITEE ON TROPICAL SOILS OF ISSMFE. Peculiarities of geotechnical behavior of tropical lateritic and saprolitic soils. *Progress Report 1982-1985*. Theme 1. ABMS, 1985.
- DER-SP – DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Manual de normas de pavimentação*. São Paulo: DER-SP, 1991.

- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 049/1994: *solos: determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas: método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1994.
- \_\_\_\_\_. ME 228/94: *solos: compactação em equipamento miniatura*. Rio de Janeiro, 1994.
- \_\_\_\_\_. ME 256/94: *solos compactados com equipamento miniatura: determinação da perda de massa por imersão*. Rio de Janeiro, 1994.
- \_\_\_\_\_. ME 258/94: *solos compactados em equipamento miniatura: mini-MCV*. Rio de Janeiro, 1994.
- \_\_\_\_\_. *Manual de pavimentação*. 2. ed. IPR Publicação n. 697/100. Rio de Janeiro: DNER, 1996. 320p.
- \_\_\_\_\_. ES 301: *pavimentação: sub-base estabilizada granulometricamente*. Rio de Janeiro, 1997a.
- \_\_\_\_\_. ES 303: *pavimentação: base estabilizada granulometricamente*. Rio de Janeiro, 1997.
- \_\_\_\_\_. ES 304: *pavimentação: base de solo melhorado com cimento*. Rio de Janeiro, 1997.
- \_\_\_\_\_. ES 305: *pavimentação: base de solo cimento*. Rio de Janeiro, 1997.
- \_\_\_\_\_. ES 316: *pavimentação: base de macadame hidráulico*. Rio de Janeiro, 1997.
- \_\_\_\_\_. ME 254: *solos compactados em equipamento miniatura: mini-CBR e expansão*. Rio de Janeiro, 1997.
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. *Manual de pavimentação*. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.
- FERNANDES, C.G. *Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte para uso em pavimentação*. 2004. 109 f. Dissertação (Mestrado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- FORTES, R.M. e NOGAMI, J.S. Método expedito de identificação do grupo MCT de solos tropicais utilizando-se anéis de PVC rígido. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 25., 1991, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABPv, 1991. v. 1, p. 591-604.
- GODOY, H. *Identificação e classificação geotécnica de latossolos do estado de São Paulo pelo método das pastilhas MCT*. 1997. 132 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- GODOY, H.; BERNUCCI, L.L.B. O método das pastilhas na compreensão das propriedades geotécnicas básicas dos solos: um recurso didático. In: CONGRESSO DE PESQUISA EM TRANSPORTES, 16., 2002, Natal. *Anais...* Rio de Janeiro: ANPET, 2002. v. 1. p. 145-56.
- HVEEM, F.N. Pavement deflections and fatigue failures. In: ANNUAL MEETING, 34., 1955. *Bulletin*, n. 114, p. 43-73, 1955.
- HVEEM, F.N.; ZUBE, E.; BRIDGES, R.; FORSYTHE, R. The effect of resilience-deflection relationship on the structural design of asphaltic pavements. In: INTER. CONF. ON THE STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENTS, 1962. *Proceedings...* Ann Arbor, USA, 1963. p. 649-66.
- KLEYN, E.G. *The use of the dynamic cone penetrometer (DCP)*. Pretoria: Transvaal Roads Department, 1975.
- LENTZ, R.W.; BALADI, G.Y. Prediction of permanent strain in sand subjected to cyclic loading. *Transportation Research Record*, n. 749, 1980.

- LIVNEH, M. *In-situ* CBR testing by indirect methods. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 2., 1989, Rio de Janeiro. *Proceedings...* Rio de Janeiro: Publications Committee of XIICSMFE, 1989. v. 1, p. 267-70.
- LOVATO, R.S. *Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal aplicado à pavimentação*. 2004. 164 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- MACÊDO, M.M.; MOTTA, L.M.G. Comportamento de solo melhorado com cimento para uso em pavimentação sob carga repetida. In Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia de Infra-Estrutura de Transportes, 2006, Curitiba. III CLBG. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica de Solos – ABMS, 2006.
- MEDINA, J. *Mecânica dos pavimentos*. 1. ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997.
- MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. Resilient behavior of Brazilian tropical soils in pavement design. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PAVEMENT EVALUATION AND OVERLAY DESIGN, 2., 1989, Rio de Janeiro. *Proceedings...* Rio de Janeiro: ABPv, 1989. v. 1, p. 1.1.1-22.
- \_\_\_\_\_. *Mecânica dos pavimentos*. 2. ed. Rio de Janeiro, 2005.
- MONISMITH, C.L.; SEED, H.B.; MITRY, F.G.; CHAN, C. K. Prediction of pavement deflections from laboratory tests. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENTS. 1967. *Proceedings...* Ann Arbor, USA, 1967. p. 52-88.
- MOTTA, L.M.G.; MEDINA, J.; MATOS, M.V.M.; VIANNA, A.A.D. Resiliência de solos pedregulhosos lateríticos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 24., 1990, Belém do Pará. *Anais...* Belém: ABPv, 1990. p. 233-55.
- MOTTA, R.S. *Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego*. 2005. 134 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- NARDI, J.V. Cinza: uma alternativa na construção de pavimentos – noções gerais. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 23., 1988, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: ABPv, 1988. p. 287-309.
- NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, 1981, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: COPPE/CNPq/ABMS, 1981.
- \_\_\_\_\_. *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. Editora Vilibor, 1995.
- NÚÑEZ, W.P. *Análise experimental de pavimentos rodoviários delgados com basaltos alterados*. 1997. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- PORTER, O.J. Development of the original method for highway design. Development of CBR flexible pavement design method for airfields. *Transactions of American Society of Civil Engineers*, New York, v. 115, p. 461-7, 1950.
- PREGO, A.S.S. *A memória da pavimentação no Brasil*. Rio de Janeiro: ABPv, 1996.
- PREUSSLER, E.S. *Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camada de reforço*. 1983. Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- RICCI, E.; VASCONCELOS, J.F.; KRAEMER, J.L. *Estudos geotécnicos da pesquisa para avaliação estrutural de pavimentos*. Documento de trabalho n. 2, Rio de Janeiro: IPR/DNER, 1983.
- RÖHM, S.A. *Consideração sobre penetrômetros dinâmicos leves aplicados na construção e avaliação de pavimentos de baixo custo*. 1984. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

- SANTOS, J.D.G. *Contribuição ao estudo dos solos lateríticos granulares como camada de pavimento*. 1998. Tese (Doutorado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.
- SEED, H.B.; CHAN, C.K. Effect of stress history and frequency of stress application on deformation of clay subgrades under repeated loading. In: ANNUAL MEETING HIGHWAY RESEARCH BOARD, 37., 1958. *Proceedings...* p. 555-75.
- SEED, H.B.; CHAN, C.K.; LEE, C.E. Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENTS, 1962. *Proceedings...* Ann Arbor, USA, 1963. p. 611-36.
- SEED, H.B.; CHAN, C.K.; MONISMITH, C.L. Effects of repeated loading on the strength and deformation of compacted clay. In: ANNUAL MEETING HIGHWAY RESEARCH BOARD, 34., 1955. p. 541-58.
- SEED, H.B.; MITRY, F.G.; MONISMITH, C.L.; CHAN, C. K. Prediction of flexible pavement deflections from laboratory repeated-load tests. *National Cooperative Highway Research Program*, Report n. 35. Highway Research Board, 1967.
- SOUZA, M.L. (1966). *Pesquisa sobre métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis*. Rio de Janeiro: IPR, 192-GTPv-66-14.
- \_\_\_\_\_. *Método de projeto de pavimentos flexíveis*. 2. ed. Rio de Janeiro: DNER, 1979.
- \_\_\_\_\_. *Pavimentação rodoviária*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1980.
- SOUZA, M.L.; MAGALHÃES, J.P.; SILVA, R.B.; SCHLOSSER, R. Pavement performance analysis and attempt to reevaluate flexible pavement design criteria adopted by Brazil's National Highway Department. In: WORLD MEETING INTERNATIONAL ROAD FEDERATION, 8., Tóquio, 1977. D-1 AM-10.
- SUZUKI, C.Y. *Contribuição ao estudo de pavimentos rodoviários com estrutura invertida (sub-base cimentada)*. 1992. 436 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.
- TRICHÊS, G.; CARDOSO, A.B. Avaliação da capacidade de aterros e subleito de rodovias utilizando o penetrômetro dinâmico de cone e a viga Benkelman. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 13., 1999, São Carlos. *Anais...* São Carlos: ANPET, 1999. v. 1. p. 406-16.
- VERTAMATTI, E. *Contribuição ao conhecimento geotécnico de solos da Amazônia com base na investigação de aeroportos e metodologias MCT e resiliente*. 1988. Tese (Doutorado) – Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 1988.
- VILLIBOR, D.F. *Pavimentos econômicos. Novas considerações*. 1981. 224 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.
- YODER, E.J.; WITCZAK, M.W. *Principles of pavement design*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1975.

## 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 dutilidade 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<sub>sa</sub></i>	145
Figura 3.21 Esquema da partícula de agregado na determinação da <i>G<sub>sb</sub></i>	146
Figura 3.22 Esquema da partícula de agregado na determinação da <i>G<sub>se</sub></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 <sub>u</sub> 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 Karamihas, 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 $\mu$ 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 europeia, 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  
macrotextura, 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 pétreo 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-Furoil, 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
		DNIT(2005) DNIT 033/05-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<sup>a</sup>., 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.; Isacsson, 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  
Malliagos, 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<sup>aa</sup>. 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

