



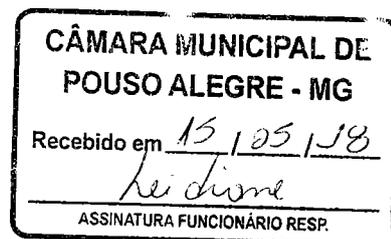
Pouso Alegre, 09 de maio de 2018.

Ofício nº 03/2018

De: Rinaldo Lima Oliveira
Secretário Municipal de Obras, Infraestrutura e Serviços Públicos

Para: Luiz Antônio dos Santos
Vereador

Referência: Requerimento nº 20/2018



Ilmo. Vereador,

15:00 hs

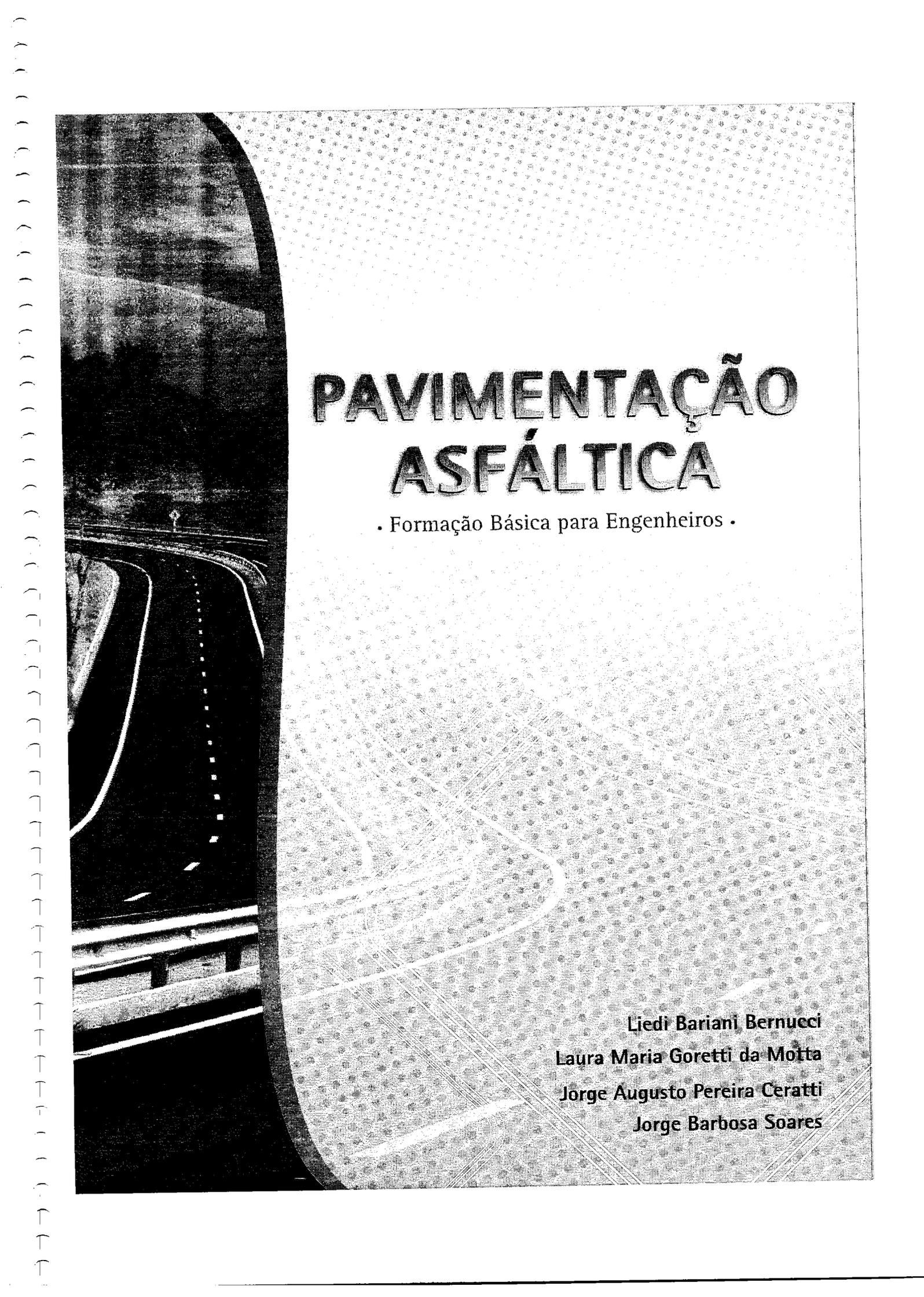
Cumprimentando-o cordialmente, sirvo-me do presente para encaminhar às mãos de Vossa Senhoria, a fim de melhor atendê-lo, cópia do manual de pavimentação asfáltica – formação básica para engenheiros, o qual contém especificações e descrições dos tipos de revestimentos asfálticos.

Com relação ao item “c”, do requerimento acima referenciado, cumpre esclarecer que utilizamos tanto asfalto à frio como à quente, sendo efetuado de acordo com as normas da ABNT.

Sem mais para o momento, reiteramos os nossos votos de estima e consideração.

Rinaldo Lima Oliveira

Secretário Municipal de Obras, Infraestrutura e Serviços Públicos



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.



Liedí 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

3ª. Reimpressão
2010



ASFALTOS



PATROCINADORES

Petrobras – Petróleo Brasileiro S. A.
Petrobras Distribuidora
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
Sônia Goulart

DESENHOS

Rogério Corrêa Alves

REVISÃO DE TEXTO

Mariflor 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., a Petrobras Distribuidora 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 Liedí 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
Petrobras Distribuidora S.A. – Asfaltos
Abeda – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos



ASFALTOS



SUMÁRIO

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

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

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

PREFÁCIO

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

A elaboração deste livro em muito assemelha-se à construção de uma estrada, e os autores o vêem como mais uma via na incessante busca de novos horizontes. Estradas preexistentes influenciam o traçado de novas rodovias, assim como a existência de diversos materiais bibliográficos contribuiu para o projeto deste livro. Os autores procuraram ao máximo tráfegar 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.

4.1 INTRODUÇÃO

Os pavimentos são estruturas de múltiplas camadas, sendo o revestimento a camada que se destina a receber a carga dos veículos e mais diretamente a ação climática. Portanto, essa camada deve ser tanto quanto possível impermeável e resistente aos esforços de contato pneu-pavimento em movimento, que são variados conforme a carga e a velocidade dos veículos.

Na maioria dos pavimentos brasileiros usa-se como revestimento uma mistura de agregados minerais, de vários tamanhos, podendo também variar quanto à fonte, com ligantes asfálticos que, de forma adequadamente proporcionada e processada, garanta ao serviço executado os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local.

Os requisitos técnicos e de qualidade de um pavimento asfáltico serão atendidos com um projeto adequado da estrutura do pavimento e com o projeto de dosagem da mistura asfáltica compatível com as outras camadas escolhidas. Essa dosagem passa pela escolha adequada de materiais dentro dos requisitos comentados nos Capítulos 2 e 3, proporcionados de forma a resistirem às solicitações previstas do tráfego e do clima.

Nos casos mais comuns, até um determinado volume de tráfego, um revestimento asfáltico de um pavimento novo consiste de uma única camada de mistura asfáltica (Figura 4.1).

Foto: Tonial, 2005

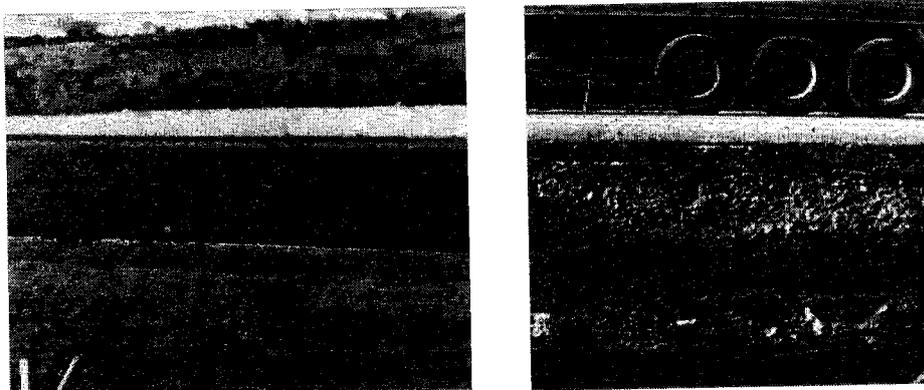


Figura 4.1 Exemplos de estrutura de pavimento novo com revestimento asfáltico

O material de revestimento pode ser fabricado em usina específica (misturas usinadas), fixa ou móvel, ou preparado na própria pista (tratamentos superficiais). Os revestimentos são também identificados quanto ao tipo de ligante: a quente com o uso de CAP, ou a frio com o uso de EAP. As misturas usinadas podem ser separadas quanto à distribuição granulométrica em: densas, abertas, contínuas e descontínuas, conforme visto no Capítulo 3.

Em casos de recomposição da capacidade estrutural ou funcional, além dos tipos descritos, é possível ainda lançar mão de outros tipos de misturas asfálticas que se processam em usinas móveis especiais que promovem a mistura agregados-ligante imediatamente antes da colocação no pavimento, podendo ser separadas em misturas novas relativamente fluidas (lama asfáltica e microrrevestimento) e misturas recicladas com uso de fresadoras-recicladoras. Cada uma dessas misturas tem requisitos próprios de dosagem e atendem a certa finalidade, sempre associada a espessuras calculadas em função do tráfego e do tipo de materiais existentes nas outras camadas.

Vale comentar que neste livro será dado destaque às especificações do antigo DNER ou do atual DNIT por serem de cunho nacional, muito conhecidas no meio técnico, e, muitas vezes, por servirem de base para as especificações regionais. No entanto, cabe ao engenheiro de pavimentação procurar informações em cada estado ou em cada órgão responsável pela obra em questão para atender eventuais requisitos particulares. Este livro, que tem a função didática de servir aos cursos de graduação, espera mostrar os conceitos básicos associados aos revestimentos asfálticos, cabendo ao leitor a generalização do conhecimento.

4.2 MISTURAS USINADAS

A mistura de agregados e ligante é realizada em usina estacionária e transportada posteriormente por caminhão para a pista, onde é lançada por equipamento apropriado, denominado vibroacabadora. Em seguida é compactada, até atingir um grau de compressão tal que resulte num arranjo estrutural estável e resistente, tanto às deformações permanentes quanto às deformações elásticas repetidas da passagem do tráfego. A dosagem das misturas asfálticas usinadas será tratada no Capítulo 5; enquanto a produção, o transporte e as técnicas executivas serão mostrados no Capítulo 8.

As misturas a quente distinguem-se em vários tipos de acordo com o padrão granulométrico empregado e as exigências de características mecânicas, em função da aplicação a que se destina.

Um dos tipos mais empregados no Brasil é o concreto asfáltico (CA) também denominado concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Trata-se do produto da mistura convenientemente proporcionada de agregados de vários tamanhos e cimento asfáltico, ambos aquecidos em temperaturas previamente escolhidas, em função da característica viscosidade-temperatura do ligante. As misturas asfálticas a quente também se

dividem em grupos específicos em função da granulometria dos agregados, como se verá mais adiante.

O segundo grupo de misturas, feitas em usinas estacionárias próprias, são os pré-misturados a frio em que se empregam as emulsões asfálticas como ligante para envolver os agregados. Também proporcionados de forma conveniente para atender certos requisitos de arranjo do esqueleto mineral, características volumétricas e de resistência mecânica especificadas, são nesse caso realizadas sem aquecimento dos agregados. O ligante eventualmente pode sofrer um pequeno aquecimento, mas em geral é também usado na temperatura ambiente.

As misturas asfálticas também podem ser separadas em grupos específicos em função da granulometria dos agregados, como se verá a seguir.

4.2.1 Misturas a quente

As misturas asfálticas a quente podem ser subdivididas pela graduação dos agregados e filler, conforme visto no Capítulo 3. São destacados três tipos mais usuais nas misturas a quente:

- graduação **densa**: curva granulométrica contínua e bem-graduada de forma a proporcionar um esqueleto mineral com poucos vazios visto que os agregados de dimensões menores preenchem os vazios dos maiores. Exemplo: concreto asfáltico (CA);
- graduação **aberta**: curva granulométrica uniforme com agregados quase exclusivamente de um mesmo tamanho, de forma a proporcionar um esqueleto mineral com muitos vazios interconectados, com insuficiência de material fino (menor que 0,075mm) para preencher os vazios entre as partículas maiores, com o objetivo de tornar a mistura com elevado volume de vazios com ar e, portanto, drenante, possibilitando a percolação de água no interior da mistura asfáltica. Exemplo: mistura asfáltica drenante, conhecida no Brasil por camada porosa de atrito (CPA);
- graduação **descontínua**: curva granulométrica com proporcionamento dos grãos de maiores dimensões em quantidade dominante em relação aos grãos de dimensões intermediárias, completados por certa quantidade de finos, de forma a ter uma curva descontínua em certas peneiras, com o objetivo de tornar o esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente com o maior número de contatos entre os agregados graúdos. Exemplo: matriz pétreo asfáltica (*stone matrix asphalt* – SMA); mistura sem agregados de certa graduação (*gap-graded*).

A Figura 4.2 mostra exemplos de composições de agregados de diferentes graduações. A Figura 4.3 mostra as diversas frações que compõem um concreto asfáltico (CA), como ilustração da participação de todos os tamanhos em quantidades proporcionais. A Figura 4.4 apresenta exemplos de curvas granulométricas que ilustram os três tipos de composição do esqueleto mineral. A Figura 4.5 mostra exemplos de corpos-de-prova moldados em laboratório ou extraídos do campo, de três tipos de mistura asfáltica: CA (densa), SMA (descontínua) e CPA (aberta ou porosa). A Figura 4.6 apresenta uma amostra extraída de um revestimento asfáltico de pista, exibindo três camadas de misturas asfálticas.

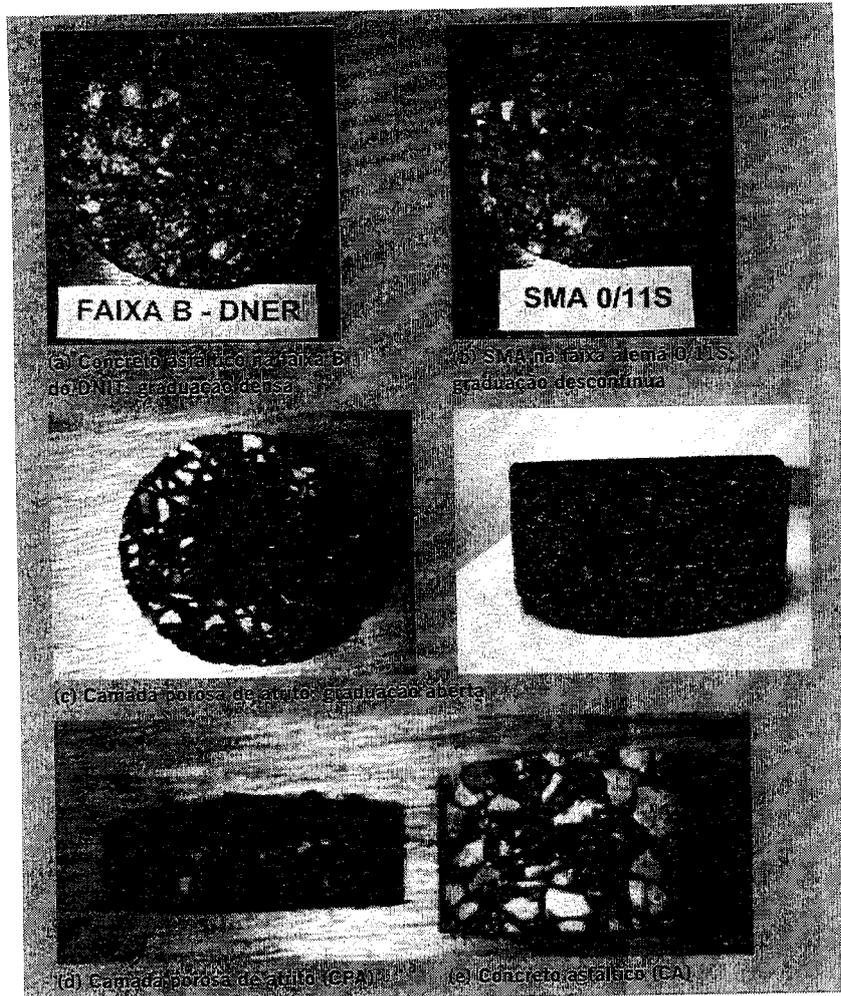


Figura 4.5 Exemplos de corpos-de-prova de misturas asfálticas a quente

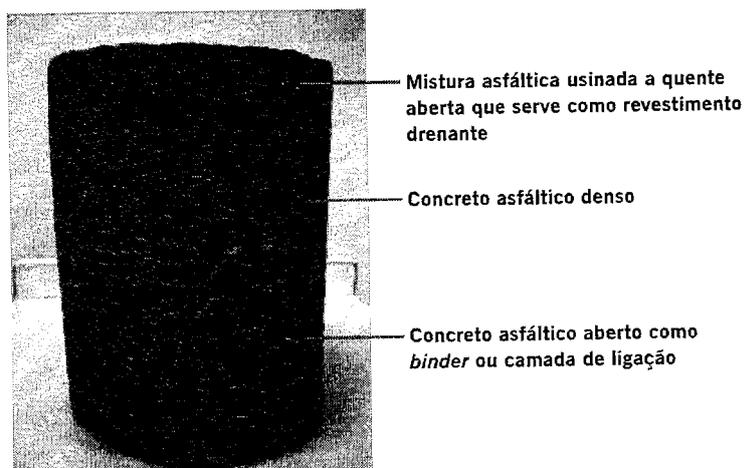


Figura 4.6 Corpo-de-prova extraído de pista mostrando a composição do revestimento asfáltico

Todos esses tipos de misturas asfálticas a quente são utilizados como revestimento de pavimentos de qualquer volume de tráfego, desde o muito baixo até o muito elevado, sendo que os tipos especiais, SMA e CPA, sempre são colocados sobre outra camada preexistente de concreto asfáltico ou de outro material, até de concreto de cimento Portland.

Quando a espessura de projeto de revestimento for maior que 70mm é comum fazer uma subdivisão em duas camadas para fins de execução; a superior que fica em contato com os pneus dos veículos é chamada de camada de rolamento ou simplesmente de “capa” e tem requisitos de vazios bastante restritos, para garantir a impermeabilidade; a camada inferior é referida como camada de ligação ou intermediária (ou ainda de *binder*) e pode ser projetada com um índice de vazios ligeiramente maior, com a finalidade de diminuir o teor de ligante e baratear a massa asfáltica. Esse procedimento também modificará as características mecânicas e de flexibilidade da mistura, o que deve ser levado em conta no dimensionamento do pavimento.

Os pré-misturados a quente que não atendem a requisitos granulométricos de camada intermediária ou de nivelamento, mas são preparados com tamanhos nominais máximos de agregados graúdos de grandes dimensões são referidos genericamente de PMQ, devendo atender a especificação de serviço particular para camada especial de correção de desnivelamentos ou regularização em pavimentos em uso.

Concreto asfáltico denso (CA)

O concreto asfáltico é a mistura asfáltica muito resistente em todos os aspectos, desde que adequadamente selecionados os materiais e dosados convenientemente. Pode ser:

- convencional: CAP e agregados aquecidos, segundo a especificação DNIT-ES 031/2004;
- especial quanto ao ligante asfáltico:
 - com asfalto modificado por polímero ou com asfalto-borracha;
 - com asfalto duro, misturas de módulo elevado (*enrobé à module élevé* – EME).

Graças ao arranjo de partículas com graduação bem-graduada, a quantidade de ligante asfáltico requerida para cobrir as partículas e ajudar a preencher os vazios não pode ser muito elevada, pois a mistura necessita contar ainda com vazios com ar após a compactação em torno de 3 a 5%, no caso de camada de rolamento (camada em contato direto com os pneus dos veículos) e de 4 a 6% para camadas intermediárias ou de ligação (camada subjacente à de rolamento). Caso não seja deixado certo volume de vazios com ar, as misturas asfálticas deixam de ser estáveis ao tráfego e, por fluência, deformam-se significativamente. A faixa de teor de asfalto em peso está normalmente entre 4,5 a 6,0%, dependendo da forma dos agregados, massa específica dos mesmos, da viscosidade e do tipo do ligante, podendo sofrer variações em torno desses valores. Para o teor de projeto, a relação betume-vazios está na faixa de 75 a 82% para camada de rolamento e 65 a 72% para camada de ligação (ver Capítulo 5).

A Tabela 4.1 mostra as faixas granulométricas recomendadas pelo DNIT 031/2004-ES. Esta norma ainda estabelece valores de parâmetros mecânicos que são discutidos nos Capítulos 5 e 6, por exemplo, estabilidade Marshall mínima de 500kgf, com 75 golpes de compactação por face dos corpos-de-prova tipo Marshall e resistência à tração por compressão diametral mínima de 0,65MPa, aos 25°C.

TABELA 4.1 FAIXAS GRANULOMÉTRICAS E REQUISITOS PARA CONCRETO ASFÁLTICO (DNIT 031/2004-ES)

Peneira de malha quadrada Série ASTM	Abertura (mm)	Faixas Porcentagem em massa, passando			Tolerância
		A	B	C	
2"	50,8	100	-	-	-
1 1/2"	38,1	95-100	100	-	±7%
1"	25,4	75-100	95-100	-	±7%
3/4"	19,1	60-90	80-100	100	±7%
1/2"	12,7	-	-	80-100	±7%
3/8"	9,5	35-65	45-80	70-90	±7%
Nº 4	4,8	25-50	28-60	44-72	±5%
Nº 10	2,0	20-40	20-45	22-50	±5%
Nº 40	0,42	10-30	10-32	8-26	±5%
Nº 80	0,18	5-20	8-20	4-16	±5%
Nº 200	0,075	1-8	3-8	2-10	±2%
Teor de asfalto, %		4,0 a 7,0	4,5 a 7,5	4,5 a 9,0	±0,3%
Tipo de camada de revestimento asfáltico		Camada de ligação	Camada de ligação ou rolamento	Camada de rolamento	

O sistema Superpave utiliza para especificar a granulometria do agregado um gráfico onde o eixo das abscissas é dado pela abertura das peneiras, em milímetros, elevado à potência de 0,45. Para que a graduação em estudo atenda aos critérios Superpave, a curva granulométrica deve passar entre os pontos de controle definidos na Tabela 4.2. No passado, foi considerada uma região do gráfico, chamada de zona de restrição, local onde a curva granulométrica não deveria passar, conforme exemplo apresentado na Figura 4.7, que se encontra atualmente em desuso.

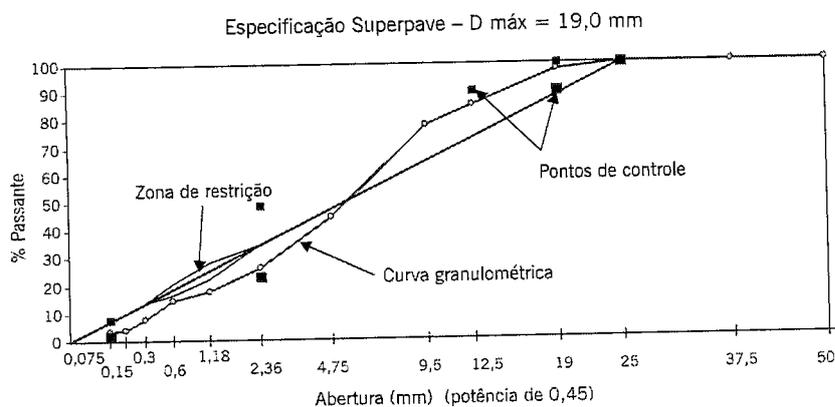


Figura 4.7 Exemplo da representação da granulometria segundo a especificação Superpave para um tamanho nominal máximo de 19mm

As zonas de restrição que foram inicialmente consideradas nos primeiros documentos e especificações do SHRP tinham por objetivo evitar misturas de difícil compactação e com potencialidade de ocorrência de deformação permanente devido à proporção elevada de areia fina natural em relação à areia total. Muitos estudos mostraram que quando se utiliza areia britada ou mesmo areias com angulosidade elevada, esta zona de restrição não se aplica. Assim nas especificações mais recentes as zonas de restrição foram desconsideradas. Na Tabela 4.3 indicam-se os critérios de dosagem de concreto asfáltico pelo método SUPERPAVE.

TABELA 4.2 PONTOS DE CONTROLE DE ACORDO COM O TAMANHO NOMINAL MÁXIMO DO AGREGADO (SUPERPAVE)

Abertura (mm)	Pontos de controle									
	Porcentagem em massa, passando									
	37,5mm		25,0mm		19,0mm		12,5mm		9,5mm	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
50	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—
37,5	90	100	100	—	—	—	—	—	—	—
25	—	90	90	100	100	—	—	—	—	—
19	—	—	—	90	90	100	100	—	—	—
12,5	—	—	—	—	—	90	90	100	100	—
9,5	—	—	—	—	—	—	—	90	90	100
4,75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	90
2,36	15	41	19	45	23	49	28	58	32	67
0,075	0	6	1	7	2	8	2	10	2	10

Obs.: Tamanho nominal máximo é definido como sendo um tamanho maior do que o primeiro tamanho de peneira que retém mais de 10%.

TABELA 4.3 REQUISITOS VOLUMÉTRICOS DA DOSAGEM SUPERPAVE (AASHTO M 323/04)

Tráfego N AASHTO x 10 ⁶	Densidade relativa requerida, % G _{mm}			Vazios do agregado mineral (VAM), % mínima						Relação betume- vazios (RBV), %	Relação pó-betume efetivo (RPB), %
				Tamanho máximo nominal (TMN), mm							
	N _{ini}	N _{des}	N _{max}	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75		
< 0,3	≤ 91,5	96,0	≤ 98,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	70 - 80	0,6 - 1,2
0,3 a 3	≤ 90,5	96,0	≤ 98,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	65 - 78	0,6 - 1,2
3 a 10	≤ 89,0	96,0	≤ 98,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	65 - 75	0,6 - 1,2
10 a 30	≤ 89,0	96,0	≤ 98,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	65 - 75	0,6 - 1,2
> 30	≤ 89,0	96,0	≤ 98,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	65 - 75	0,6 - 1,2

Concretos asfálticos densos são as misturas asfálticas usinadas a quente mais utilizadas como revestimentos asfálticos de pavimentos no Brasil. Suas propriedades, no entanto, são muito sensíveis à variação do teor de ligante asfáltico. Uma variação positiva, às vezes dentro do admissível em usinas, pode gerar problemas de deformação

permanente por fluência e/ou exsudação, com fechamento da macrotextura superficial. De outro lado, a falta de ligante gera um enfraquecimento da mistura e de sua resistência à formação de trincas, uma vez que a resistência à tração é bastante afetada e sua vida de fadiga fica muito reduzida.

Uma das formas de reduzir a sensibilidade dos concretos asfálticos a pequenas variações de teor de ligante e torná-lo ainda mais resistente e durável em vias de tráfego pesado é substituir o ligante asfáltico convencional por ligante modificado por polímero ou por asfalto-borracha.

O uso de asfaltos duros em concretos asfálticos é muito difundido na França e, atualmente, também nos Estados Unidos. Esses concretos asfálticos recebem o nome de misturas de módulo elevado (EME) por apresentarem módulo de resiliência elevado e também elevada resistência à deformação permanente, parâmetros apresentados no Capítulo 6. Possuem curvas granulométricas próximas à de máxima densidade, maximizando a resistência ao cisalhamento e minimizando os vazios. Não são empregadas como camada de rolamento devido à textura superficial muito lisa resultante, dificultando a aderência pneu-pavimento em dias de chuva. Sobre essas camadas de EME, como camada de rolamento são empregados em geral revestimentos delgados com a finalidade exclusivamente funcional.

CPA – camada porosa de atrito ou revestimento asfáltico drenante

As misturas asfálticas abertas do tipo CPA – camada porosa de atrito – mantêm uma grande porcentagem de vazios com ar não preenchidos graças às pequenas quantidades de filler, de agregado miúdo e de ligante asfáltico. Essas misturas asfálticas a quente possuem normalmente entre 18 e 25% de vazios com ar – DNER-ES 386/99. Na França essas misturas asfálticas podem conter até 30% de vazios com ar. A CPA é empregada como camada de rolamento com a finalidade funcional de aumento de aderência pneu-pavimento em dias de chuva. Esse revestimento é responsável pela coleta da água de chuva para o seu interior e é capaz de promover uma rápida percolação da mesma devido à sua elevada permeabilidade, até a água alcançar as sarjetas. A característica importante dessa mistura asfáltica é que ela causa: redução da espessura da lâmina d'água na superfície de rolamento e conseqüentemente das distâncias de frenagem; redução do spray proveniente do borrifio de água pelos pneus dos veículos, aumentando assim a distância de visibilidade; e redução da reflexão da luz dos faróis noturnos. Todos esses aspectos conjuntos são responsáveis pela redução do número de acidentes em dias de chuva. Outro fator importante é a redução de ruído ao rolamento, amenizando esse desconforto ambiental em áreas nas proximidades de vias com revestimentos drenantes. Esta camada drenante é executada sobre uma camada de mistura densa e estrutural.

A Figura 4.8 mostra uma foto de uma rodovia com um revestimento convencional do tipo CA denso, seguido de um trecho com CPA, em um dia chuvoso, no início da noite. Observe-se a diferença da presença de água na superfície do CA e a reflexão de luz dos faróis, fatos não observados no trecho consecutivo com CPA. A outra foto é de um trecho de CPA na Bahia.

A Figura 4.9 mostra a CPA executada no Aeroporto Santos Dumont no Rio de Janeiro em 2003, a realização do ensaio de permeabilidade e aspectos da textura superficial logo após a construção.

A especificação brasileira do DNER-ES 386/99 recomenda para CPA cinco faixas granulométricas e teor de ligante asfáltico entre 4,0 e 6,0% – Tabela 4.4. Porém, devido à particularidade granulométrica, a quantidade de ligante é geralmente reduzida, ficando

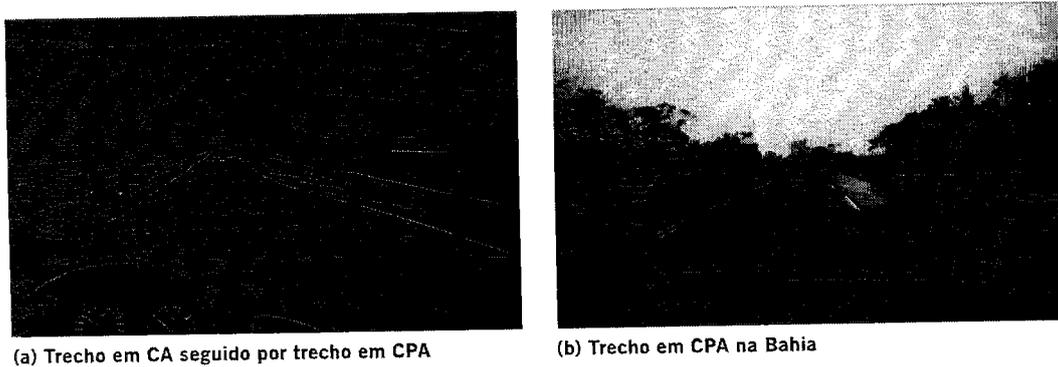


Figura 4.8 Exemplos de rodovias com camada porosa de atrito sob chuva

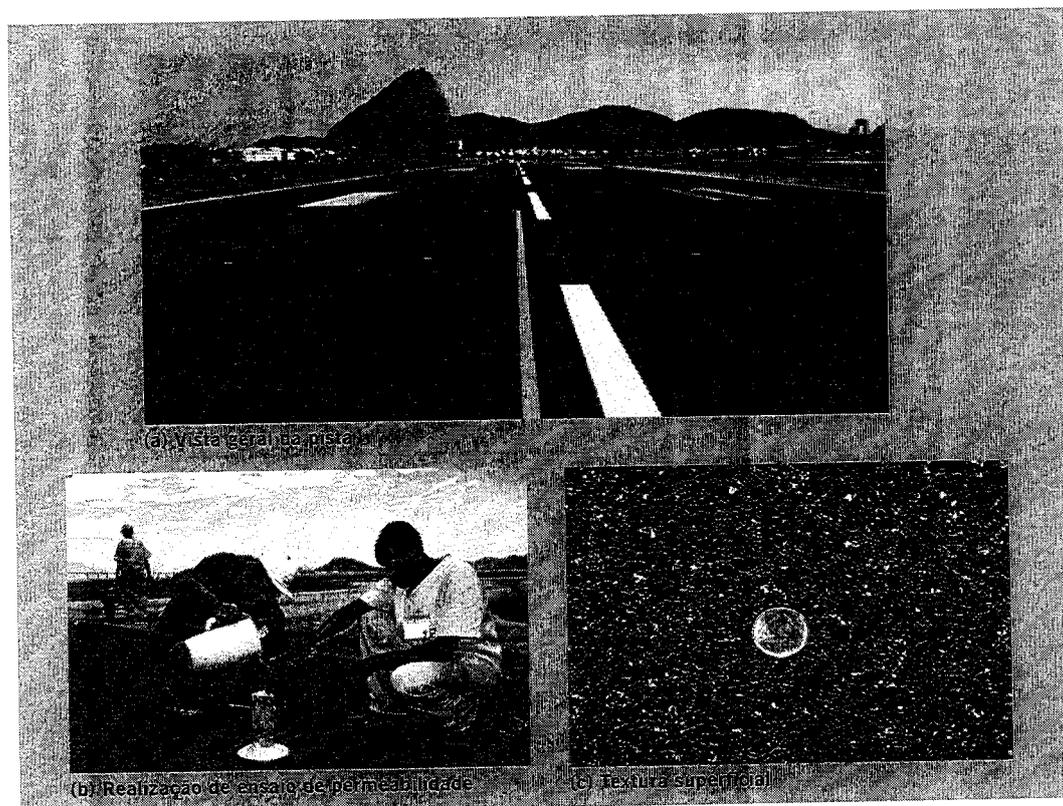


Figura 4.9 Aspectos da CPA no Aeroporto Santos Dumont – RJ
(Fotos: BR Distribuidora)

TABELA 4.4 FAIXAS GRANULOMÉTRICAS E REQUISITOS DE DOSAGEM DA CAMADA POROSA DE ATRITO (DNER-ES 386/99)

Peneira de malha quadrada	Abertura mm	Faixas					Tolerância
		Porcentagem em massa, passando					
ABNT		I	II	III	IV	V	
3/4"	19,0	-	-	-	-	100	-
1/2"	12,5	100	100	100	100	70-100	±7
3/8"	9,5	80-100	70-100	80-90	70-90	50-80	±7
Nº 4	4,8	20-40	20-40	40-50	15-30	18-30	±5
Nº 10	2,0	12-20	5-20	10-18	10-22	10-22	±5
Nº 40	0,42	8-14	-	6-12	6-13	6-13	±5
Nº 80	0,18	-	2-8	-	-	-	±3
Nº 200	0,075	3-5	0-4	3-6	3-6	3-6	±2
Ligante modificado por polímero, %				4,0-6,0			±0,3
Espessura da camada acabada, cm		3,0			≤ 4,0		
Volume de vazios, %				18-25			
Ensaio Cântabro, % máx.				25			
Resistência à tração por compressão diametral, a 25°C, MPa, min.				0,55			

em média em torno de 3,5 a 4,5%, dependendo do tipo de agregado, forma, natureza, viscosidade e tipo de ligante. O ligante utilizado deverá ter baixa suscetibilidade térmica e alta resistência ao envelhecimento. Em geral recomenda-se o emprego de asfalto modificado por polímero para aumentar a durabilidade e reduzir a desagregação.

A camada inferior à CPA deve ser necessariamente impermeável para evitar a entrada de água no interior da estrutura do pavimento.

A CPA deve ser dosada pelo método Marshall (discutido no Capítulo 5), prevalecendo o volume de vazios requerido. Os agregados devem ser 100% britados e bem resistentes (abrasão Los Angeles $\leq 30\%$) para não serem quebrados na compactação, pois eles estão em contato uns com os outros e a tensão nesse contato é muito elevada durante o processo de densificação. Para ter um contato efetivo dos agregados, eles devem ser cúbicos com o índice de forma $\geq 0,5$. A absorção de água para cada fração deve ser no máximo de 2%, e quanto à sanidade deve apresentar perda de $\leq 12\%$.

Um teste fundamental a ser realizado é o desgaste por abrasão Cântabro, recomendado originalmente pelos espanhóis para esse tipo de mistura aberta drenante. Esse ensaio é abordado no Capítulo 6.

Na Europa tem-se procedido à limpeza desses revestimentos, após certo tempo de uso, com equipamentos projetados para essa finalidade a fim de minimizar os problemas de colmatação, resultantes da contaminação dos vazios por impurezas, uma vez que devido a elas há redução da permeabilidade.

Como exemplos da utilização da camada porosa de atrito no Brasil, são citadas as seguintes obras:

- Aeroporto Santos Dumont no Rio de Janeiro: em 1999, foi executado um pavimento superposto, na pista principal, e sobre ele aplicada uma CPA nos 923m centrais, com coeficiente mínimo de atrito de 0,61 (μ meter). Para manter esse nível de atrito, a camada de CPA foi renovada em 2003, nos pontos de maior uso, visto que houve colmatagem dos vazios e perda de capacidade drenante ao final de seis anos de uso intenso;
- Rodovia dos Imigrantes, ligando São Paulo a Santos: em 1998 foi feita uma restauração através de fresagem seguida de recapeamento, com uma espessura de 5cm entre os quilômetros 11,5 e 30;
- Rodovia Presidente Dutra, próximo a São Paulo: em 1998, 3km nas três faixas e no acostamento apresentavam condições precárias antes da restauração, com buracos, trincamento generalizado e bombeamento de material da base na superfície. Foi efetuada uma fresagem do revestimento existente ou recomposição do greide da pista com caimento de 3%; executada uma camada de 2cm de microrrevestimento asfáltico a frio e aplicada uma CPA com 4cm de espessura.

SMA – Stone Matrix Asphalt

A sigla SMA significa originalmente *Splittmastixasphalt* conforme designação na Alemanha – local de sua concepção, traduzido em inglês para *Stone Mastic Asphalt*, e posteriormente para *Stone Matrix Asphalt*, sendo esta última terminologia adotada nos Estados Unidos e, atualmente, também no Brasil. Em português SMA pode ser traduzido para matriz pétreo asfáltica, porém a denominação pela sigla original internacionaliza a terminologia e gera menos confusão de conceitos e especificações.

Concebido em 1968 na Alemanha, a partir dos anos 80 passou a ser utilizado amplamente na Europa, em países como Bélgica, Holanda, Suíça, Suécia, Inglaterra, Espanha, entre outros. Uma das aplicações mais freqüentes alemãs tem sido a reabilitação de pavimentos de concreto de cimento Portland. As misturas asfálticas densas convencionais em geral resistem pouco à reflexão de trincas e à deformação permanente, o que é retardado na solução de SMA. Em 1990, o SMA foi introduzido no Canadá e em 1991 nos Estados Unidos. Atualmente a tecnologia vem sendo aplicada também na Ásia e na América Latina.

O SMA é um revestimento asfáltico, usinado a quente, concebido para maximizar o contato entre os agregados graúdos, aumentando a interação grão/grão; a mistura se caracteriza por conter uma elevada porcentagem de agregados graúdos e, devido a essa particular graduação, forma-se um grande volume de vazios entre os agregados graúdos. Esses vazios, por sua vez, são preenchidos por um mástique asfáltico, constituído pela mistura da fração areia, fíler, ligante asfáltico e fibras. O SMA é uma mistura rica em ligante asfáltico, com um consumo de ligante em geral entre 6,0 e 7,5%. Geralmente é aplicado em espessuras variando entre 1,5 a 7cm, dependendo da faixa granulométrica. São misturas que tendem a ser impermeáveis com volume de vazios que variam de 4 a 6% em pista, ao contrário da CPA vista anteriormente.

A Figura 4.10 ilustra a composição granulométrica do SMA em comparação com um CA. Observe-se a maior quantidade de consumo de agregado graúdo na mistura SMA. A Figura 4.11 mostra o aspecto final de uma camada de SMA sendo executada em pista. O SMA é recomendado para aplicação em pavimentos como camada de rolamento ou de ligação.

Devido à graduação e alta concentração de agregados graúdos, tem-se macrotextura (ver Capítulo 9) superficialmente rugosa, formando pequenos “canais” entre os agregados

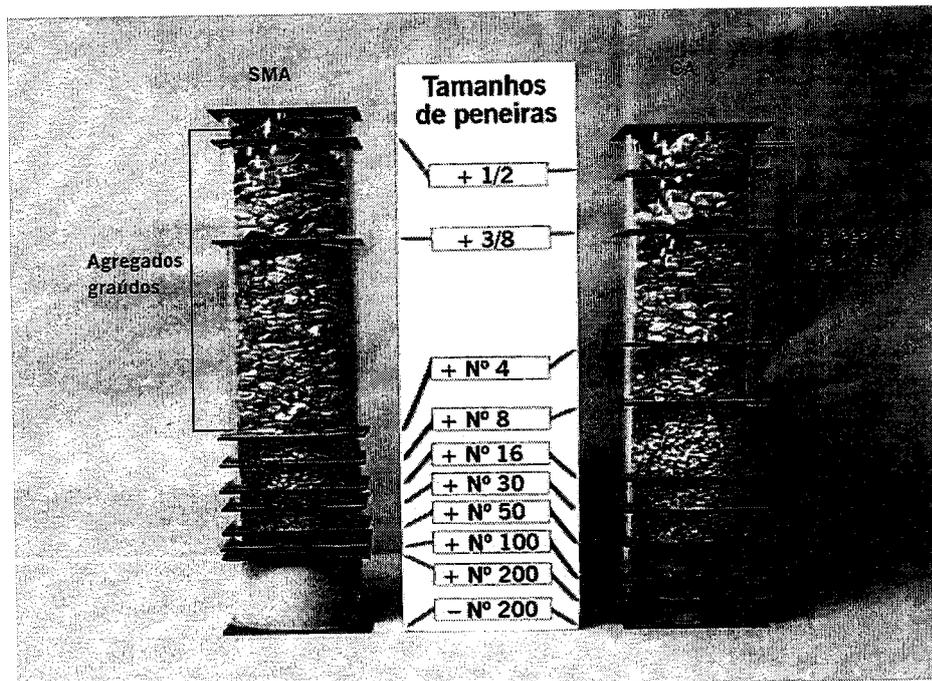


Figura 4.10 Composições granulométricas comparativas entre um SMA e um CA
(Foto: Horst Erdlen)

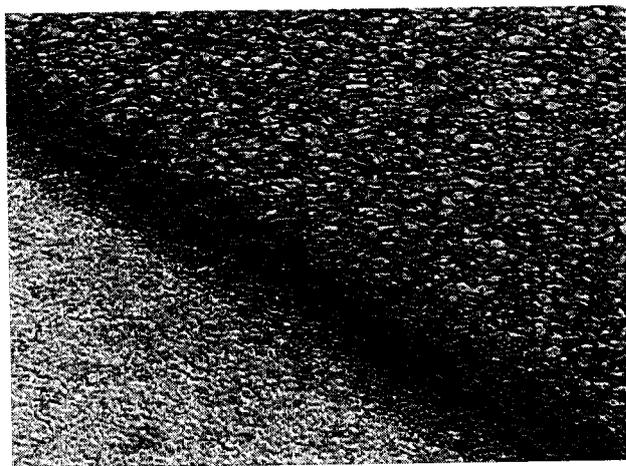


Figura 4.11 Exemplo do aspecto de uma camada de SMA executada em pista

gráudos, responsáveis por uma eficiente drenabilidade superficial e aumento de aderência pneu-pavimento em dias de chuva.

No país, pioneiramente foi construída a pista do autódromo de Interlagos em São Paulo em fevereiro de 2000, empregando-se o SMA (Beligni *et al.*, 2000). Em agosto de 2001 foi construído um trecho experimental de SMA na curva mais fechada e perigosa da Via Anchieta, rodovia que interliga São Paulo a Santos, mostrando grande sucesso e superioridade de comportamento funcional e estrutural em relação a outras soluções asfálticas até então empregadas (Reis *et al.*, 2002). Desde então outros trechos vêm sendo executados usando ora graduações alemãs, ora americanas. As mais recentes obras são em rodovias dos estados de São Paulo e Minas Gerais, além de uso urbano em São Paulo, Rio de Janeiro e Salvador.

A especificação alemã foi a primeira a ser publicada como norma, em 1984, e engloba quatro tipos de SMA, denominados de 0/11S; 0/8S; 0/8 e 0/5, sendo o último algarismo referente ao diâmetro nominal máximo do agregado (onde até 10% no máximo ficam retidos em peneira desse tamanho) – Tabela 4.5 (ZTV Asphalt – StB, 2001). Para tráfego pesado ou solicitações especiais, as especificações restringem-se às faixas 0/11S e 0/8S.

TABELA 4.5 FAIXAS GRANULOMÉTRICAS E REQUISITOS DE SMA PELA ESPECIFICAÇÃO ALEMÃ (ZTV Asphalt – StB 94, 2001)

Peneira	Faixas			
	Porcentagem em massa			
	SMA 0/11S	SMA 0/8S	SMA 0/8	SMA 0/5
< 0,09mm	9–13	10–13	8–13	8–13
> 2mm	73–80	73–80	70–80	60–70
> 5mm	60–70	55–70	45–70	< 10
> 8mm	> 40	< 10	< 10	-
> 11,2mm	< 10	-	-	-
Características e requisitos				
Tipo de asfalto ¹	B65 ou PmB45	B65 ou PmB45	B 80	B80 ou B200
Teor de asfalto na mistura, % em peso	> 6,5	> 7,0	> 7,0	> 7,2
Fibras na mistura, % em peso	0,3 a 1,5			
Dosagem	Marshall (50 golpes por face)			
Temperatura de compactação, °C	135°C ± 5°C (para PmB deve ser 145°C ± 5°C)			
Volume de vazios, %	3,0–4,0	3,0–4,0	2,0–4,0	2,0–4,0
Camada de rolamento				
Espessura, mm	35–40	30–40	20–40	15–30
Ou consumo, kg/m ²	85–100	70–100	45–100	35–75
Camada de nivelamento				
Espessura, mm	25–50	20–40	-	-
Ou consumo, kg/m ²	60–125	45–100	-	-
Grau de compactação			> 97 %	
Volume de vazios da camada compactada			< 6,0 %	

¹ A designação B corresponde a asfaltos convencionais e o número significa a penetração; PmB são modificados por polímeros. Os asfaltos polímeros (PmB45) são recomendados para solicitações especiais.

Na União Européia há outras faixas sugeridas, incluindo diâmetros nominais reduzidos, como 4 e 6mm, ou mesmo muito maiores, como 16, 19 ou ainda 25mm. A especificação norte-americana do SMA segue a norma da AASHTO MP 8-02, recomendando três faixas – Tabela 4.6. As propriedades da mistura são ditadas por especificações obtidas no equipamento de compactação giratório Superpave – Tabela 4.7.

TABELA 4.6 FAIXAS GRANULOMÉTRICAS NORTE-AMERICANAS SEGUNDO AASHTO MP 8-02

Abertura (mm)	Faixas					
	Porcentagem em massa, passando					
	19,0mm		12,5mm		9,5mm	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
25	-	100	-	-	-	-
19	90	100	-	100	-	-
12,5	50	88	90	99	-	-
9,5	25	60	50	85	100	100
4,75	20	28	20	40	70	95
2,36	16	24	16	28	30	50
1,18	-	-	-	-	20	30
0,6	-	-	-	-	-	21
0,3	-	-	-	-	-	18
0,075	8	11	8	11	12	15

TABELA 4.7 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DA MISTURA SMA SEGUNDO AASHTO MP 8-02

Propriedade	Requisito para corpos-de-prova compactados no equipamento giratório – Superpave
Volume de vazios, %	4,0 ^a
VAM (vazios no agregado mineral), % mín.	17
VCAmix ^b	< VCA _{dr} ^b
Estabilidade Marshall, N, mín.	6.200 ^c
RRT – Resistência à tração retida (AASHTO T 283), % mín.	70
Teste de escoamento (<i>draindown</i>) na temperatura de produção ^d , % em peso máx.	0,30
Teor de asfalto na mistura, % mín.	6,0

^a Em locais com clima frio o projeto pode ser realizado para 3,5% de volume de vazios.

^b VCAmix corresponde aos vazios totais do agregado graúdo, e VCA_{dr} aos vazios com ar requerido + vazios ocupados pela fibra e asfalto + vazios ocupados pelos agregados miúdos.

^c Valor sugerido da prática.

^d Escoamento segundo AASHTO T 305-97.

As faixas com diâmetro nominal máximo de 19mm e 12,5mm são até o momento as mais empregadas nos Estados Unidos. A faixa com tamanho nominal máximo de 9,5mm tem sido a adotada mais recentemente e há uma tendência de aumentar seu emprego nos próximos anos.

Não há consenso na especificação dos ligantes asfálticos. As especificações são em geral não-restritivas, empregando tanto os asfaltos modificados por polímeros como as-

faltos convencionais. As fibras são geralmente orgânicas (de celulose) ou minerais, e são adicionadas durante a usinagem para evitar a segregação da mistura em seu transporte, facilitar a aplicação e evitar o escorrimento do ligante asfáltico (Napa, 1999). As fibras orgânicas podem ser utilizadas também em *pellets* ou agregações. Em alguns casos vêm impregnadas de ligante asfáltico para facilitar sua abertura na usinagem, contendo em geral 1:2 de ligante para fibras. Em alguns países são utilizadas fibras de vidro. Há diversas experiências com sucesso sem uso de fibras, porém em geral com uso de ligantes modificados.

Os agregados em praticamente todos os países são obrigatoriamente 100% britados, com esparsas exceções. Segundo a AASHTO D 5821, deve haver 100% de agregados britados em pelo menos uma face e 90% em duas faces. Os norte-americanos, como os alemães, têm especificado abrasão Los Angeles $\leq 30\%$ (AASHTO T 96), porém há casos de sucesso com agregados britados cuja abrasão excedeu 50%. A forma dos agregados é de preferência cúbica. A absorção deve ser de $\leq 2\%$ pela AASHTO T 85; o ataque aos sulfatos de sódio de $\leq 15\%$ após 5 ciclos, e de magnésio de $\leq 20\%$, conforme AASHTO T 104.

Em resumo, algumas aplicações do SMA, atualmente, são:

- vias com alta frequência de caminhões;
- interseções;
- áreas de carregamento e descarregamento de cargas;
- rampas, pontes, paradas de ônibus, faixa de ônibus;
- pistas de aeroporto;
- estacionamentos;
- portos.

As principais características de desempenho do SMA são:

- boa estabilidade a elevadas temperaturas;
- boa flexibilidade a baixas temperaturas;
- elevada resistência ao desgaste;
- boa resistência à derrapagem devido à macrotextura da superfície de rolamento;
- redução do spray ou cortina de água durante a chuva;
- redução do nível de ruído ao rolamento.

Gap-graded

Outra opção mais recentemente introduzida no Brasil é a graduação com intervalo (*gap*) – descontínua densa, conhecida por *gap-graded*, que é uma faixa granulométrica especial que resulta em macrotextura superficial aberta ou rugosa, mas não em teor de vazios elevado. Algumas utilizações dessa faixa vêm sendo realizadas com asfalto-borracha. Esse tipo de mistura asfáltica tem sido empregado como camada estrutural de revestimento, por exemplo na restauração da pavimentação e na duplicação de trechos na Rodovia BR-040, com asfalto-borracha, trecho Rio de Janeiro–Juiz de Fora, sob concessão da Concer S.A. (Cordeiro, 2006).

A Tabela 4.8 mostra a faixa granulométrica que vem sendo utilizada em serviços de pavimentação com asfalto-borracha feitos no país pela BR Distribuidora (2004). As Tabelas 4.9 e 4.10 mostram aspectos dessas misturas. A Figura 4.12 mostra a faixa granulométrica citada e a Figura 4.13 um aspecto de uma dessas aplicações feita na Rodovia Rio–Teresópolis (Fritzen, 2005).

TABELA 4.8 EXEMPLO DE UMA FAIXA GAP-GRADED COM ASFALTO-BORRACHA USADA EM PROJETOS NO PAÍS

Peneiras		Porcentagem em massa, passando				
		Mistura %	Faixa CALTRANS limite		Faixa de trabalho limite	
ABNT	Abertura (mm)	Passando	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
3/4"	19,1	100	100	100	100	100
1/2"	12,7	92,5	90	100	90	100
3/8"	9,5	87,4	78	92	82,4	92
Nº 4	4,75	40,9	28	42	35,9	42
Nº 8	2,4	20,3	15	25	15,3	25
Nº 30	0,6	11,3	10	20	10	16,3
Nº 50	0,3	8,4	7	17	7	12,4
Nº 100	0,15	6,3	4	10	4	9,3
Nº 200	0,075	4,7	2	7	2,7	6,7

(Fonte: BR Distribuidora, 2004)

TABELA 4.9 EXEMPLO DE CARACTERÍSTICAS DE UMA MISTURA GAP-GRADED COM ASFALTO-BORRACHA USADA NO PAÍS

Ensaio	Resultados	Unidade
Teor de asfalto-borracha	6	%
Massa específica teórica	2,482	g/cm ³
Vazios totais	5,7	%
Vazios cheios betume	13,7	%
Vazios do agregado mineral	19,4	%
Relação betume/vazios	70,6	%
Estabilidade	788	kgf
Fluência 1/100	14	pol.
Densidade aparente	2,34	g/cm ³

(Fonte: BR Distribuidora, 2004)

TABELA 4.10 CARACTERÍSTICAS DE ASFALTO-BORRACHA UTILIZADO EM PROJETOS DE GAP-GRADED

Caracterização do asfalto-borracha		
Ensaio	Faixa	Método
Penetração, (100g, 25°C, 5s) 0,1mm	35–70	ASTM D-5
Ponto de amolecimento, °C mín.	55	ASTM D-36
Viscosidade Brookfield a 175°C, cP	1.500–4.000	ASTM D-4402
Recuperação elástica, dutilômetro a 25°C, % mín.	50	DNER 382/99

(Fonte: BR Distribuidora)

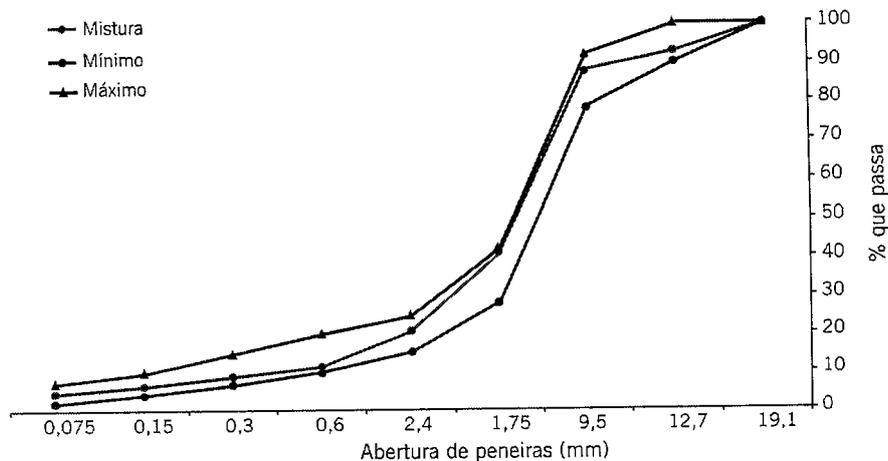


Figura 4.12 Características da faixa granulométrica *gap-graded* e a curva usada no experimento da Rodovia Rio-Teresópolis (Fritzen, 2005)



Figura 4.13 Aspecto da superfície do revestimento construído com a mistura indicada na Figura 4.12 (Fritzen, 2005)

AAUQ – areia asfalto usinada a quente

Ainda dentro do grupo das misturas a quente, têm sido utilizadas na prática as argamassas asfálticas, também denominadas areia asfalto usinada a quente (AAUQ). Em regiões onde não existem agregados pétreos graúdos, utiliza-se como revestimento uma argamassa de agregado miúdo, em geral areia, ligante (CAP), e fíler se necessário, com maior consumo de ligante do que os concretos asfálticos convencionais devido ao aumento da superfície específica (DNIT 032/2005 – ES) – Tabela 4.11. O DNIT também abre a possibilidade hoje do uso de asfalto modificado por polímero nas AAUQs através da especificação DNER-ES 387/99 – Tabela 4.12. Nas referidas tabelas as exigências se referem à compactação Marshall com 75 golpes.

TABELA 4.11 FAIXAS GRANULOMÉTRICAS E CARACTERÍSTICAS DE DOSAGEM RECOMENDADAS PELO DNIT PARA AAUQ COM CAP (DNIT 032/2005 – ES)

Peneiras		Faixas		
		Porcentagem em massa, passando		
		A	B	Tolerância
ABNT	Abertura (mm)	4,75mm	2,0mm	
3/8"	9,5	100	–	–
Nº 4	4,8	80–100	100	±5%
Nº 10	2,0	60–95	90–100	±4%
Nº 40	0,42	16–52	40–90	±4%
Nº 80	0,18	4–15	10–47	±3%
Nº 200	0,075	2–10	0–7	±2%
Emprego		Revestimento	Revestimento	
Teor de asfalto, % sobre o total da mistura		6,0–12,0	7,0–12,0	±0,3%
Volume de vazios, %		3,0–8,0		
Relação betume/vazios, %		65–82		
Estabilidade, kN, mín.		30		
Fluência, mm		2,0–4,0		

TABELA 4.12 FAIXAS GRANULOMÉTRICAS E CARACTERÍSTICAS DE DOSAGEM RECOMENDADAS PELO DNIT PARA AAUQ COM ASFALTO POLÍMERO (DNER-ES 387/99)

Peneira de malha quadrada		Faixas			Tolerância
		Porcentagem em massa, passando			
ABNT	Abertura (mm)	A	B	C	
Nº 4	4,8	100	100	100	–
Nº 10	2,0	90–100	90–100	85–100	±5%
Nº 40	0,42	40–90	30–95	25–100	±5%
Nº 80	0,18	10–47	5–60	0–62	±3%
Nº 200	0,075	0–7	0–10	0–12	±2%
Teor de asfalto, %		5,0–8,0	5,0–8,5	5,0–9,0	±0,3%
Volume de vazios, %		3,0–8,0			
Relação betume/vazios, %		65–82			
Estabilidade, kN mín.		25			
Fluência, mm		2,4–4,5			

A AAUQ é normalmente empregada como revestimento de rodovias de tráfego não muito elevado. Como toda mistura a quente, tanto o agregado quanto o ligante são aquecidos antes da mistura e são aplicados e compactados a quente. Essas misturas, devido à elevada quantidade de ligante asfáltico e presença de agregados de pequenas dimensões, requerem muito cuidado na execução (IBP, 1999). Um dos problemas mais frequentes dessas misturas é que comumente apresentam menor resistência às deformações permanentes, comparadas às misturas usinadas a quente vistas anteriormente.

Misturas asfálticas a quente especiais francesas

Os franceses têm desenvolvido várias concepções de combinação de granulometria e de ligantes especiais para comporem misturas asfálticas a serem utilizadas como camadas estruturais de revestimento, camada de ligação ou mesmo base de pavimentos.

Ligantes duros são geralmente aplicados em bases e camadas de ligação, o ligante de penetração na faixa 15/25 pode ser usado em camada de rolamento em condições favoráveis: espessura maior que 5cm, baixas deflexões nas camadas de fundação e temperaturas mínimas variando entre 0 e -10°C.

Devido a sua elevada viscosidade, a compactação torna-se um fator importante no comportamento quanto à resistência à fadiga, indicando-se temperaturas de usinagem e compactação em torno de 20°C acima das temperaturas dos ligantes convencionais (AIPCR, 1999). A Tabela 4.13 ilustra alguns ligantes duros produzidos na França para uso em misturas de alto módulo.

Os cimentos asfálticos duros podem ser puros, asfaltos modificados por asfaltita ou asfaltos modificados por polímeros. As principais características dos ligantes duros estão relacionadas à penetração a 25°C entre 10 e 20 x 10⁻¹mm, e ponto de amolecimento entre 65 e 80°C (Serfass *et al.*, 1997). Ensaio reológico e de caracterização especiais tais como BBR, espectroscopia infravermelha, teor de asfaltenos entre outros são realizados em desenvolvimento de novos materiais ou projetos especiais (Brousseau *et al.*, 2003).

A dosagem das misturas asfálticas francesas é determinada com base em requisitos de desempenho da mistura tais como resistência à fadiga, deformação permanente e resistência à umidade (ver Capítulo 6).

O uso de bases de misturas asfálticas a quente com teor de asfalto muito baixo é bastante empregado na França, em camadas espessas como substituição de bases tratadas com cimento. Esse é o conceito da mistura denominada *grave-bitume* – GB (base asfáltica) codificada em 1972. Essa base asfáltica se caracteriza pelo uso de aproximadamente 3,5% de asfalto de penetração nas faixas 40/50 ou 60/70 x 10⁻¹mm, graduação contínua e elevada proporção de agregado britado.

Nos anos 1980, a restauração das rodovias que atravessavam cidades e a reestruturação das vias lentas das auto-estradas levaram ao desenvolvimento dos revestimentos de módulo elevado que provêm da modificação de dois tipos de misturas asfálticas tradicionais: BB (*béton bitumineux*) e GB (*grave-bitume*), visando melhorar o desempenho mecânico e, em contrapartida, reduzir as espessuras (Brousseau, 2002b). Assim surgiram a mistura asfáltica de módulo elevado (*enrobé à module élevé* – EME) e o concreto betuminoso de módulo elevado (*béton bitumineux à module élevé* – BBME). A primeira é aplicada como camada de ligação (*binder*) ou como base, e foi normatizada em outubro de 1992 com o código NF P 98-140. A segunda, usada como camada de rolamento ou ligação para pavimentos que exijam revestimentos com elevada resistência à formação de trilhas de roda, está normatizada pela AFNOR desde 1993 com o código NF P 140-141 (Corté, 2001).

TABELA 4.13 CARACTERÍSTICAS DE LIGANTES DUROS PRODUZIDOS NA FRANÇA PARA EMPREGO EM MISTURAS DE MÓDULO ELEVADO (EME) (AIPCR, 1999)

Ligante não-envelhecido									
Penetração a 25°C	0,1mm	15/25	15/25	10/25	10/20	10/20	10/20	10/20	10/20
Ponto de amolecimento	°C	60/72	64/72	55/75	60/74	60/74	64/74	65/80	75/85
IP (LCPC)		0/1	0/1,5	1,3	+0,4	+0,4	-0,20	0/1	2,1
P. R. Fraass	°C	-6	-8	-6	-5	-6	+3	-3	+2
Módulo E (7,8Hz; 25°C)	MPa	54	40	34	60	56	61	66	55
Ângulo de fase (7,8Hz; 25°C)	°	37	39	38	35	29	34	-	36
Módulo E (7,8Hz; 60°C)	MPa	0,6	0,6	0,5	0,9	0,9	0,6	1	1,4
Ângulo de fase (7,8Hz; 60°C)	°	64	62	63	62	64	64	59	56
Módulo E (250Hz; 25°C)	MPa	6	6	5	8	9	7	10	10
Ângulo de fase (250Hz; 25°C)	°	63	56	57	59	60	67	61	53
Ligante após RTFOT									
Penetração a 25°C	0,1mm	11	17	18	7/13				
Penetração residual	%	69	83	86					
Ponto de amolecimento	°C	75	72	74	62/76				
Aumento do ponto de amolecimento	°C	11,5	6	6					
P. R. Fraass	°C	-4	-6	-6	0/+4				
Aumento de P. R. Fraass	°C	+2	+2	0					
Módulo E (7,8Hz; 25°C)	MPa	71	39	39					
Ângulo de fase (7,8Hz; 25°C)	°	28	35	36					
Módulo E (7,8Hz; 60°C)	MPa	1,2	0,72	0,7					
Ângulo de fase (7,8Hz; 60°C)	°	60	58	58					
Módulo E (250Hz; 25°C)	MPa	10	6	6					
Ângulo de fase (250Hz; 25°C)	°	53	54	54	47				

A necessidade de fazer a manutenção dos pavimentos já reforçados cujas exigências não eram mais aumentar a capacidade estrutural, mas restabelecer as características superficiais (principalmente impermeabilidade e textura para resistência à derrapagem) direcionaram as pesquisas para novas misturas asfálticas que pudessem ser usadas como camada delgada. Em 1979 foi codificada uma nova mistura denominada *béton bitumineux mince*, BBM (concreto asfáltico delgado) para ser executada em camadas de 30 a 40mm.

Com o objetivo de evitar elevado volume de vazios, introduziu-se o uso de granulometrias descontínuas (granulometria 0/10 com descontinuidade na fração 4/6 e granulometria 0/14 com descontinuidade 2/6 ou 2/10) e o uso de teores maiores de ligante, variando de 5,7 a 6%. A descontinuidade na curva granulométrica aumentou a aptidão à compactação além de melhorar a textura superficial. No entanto, essas duas mudanças na composição apresentaram a desvantagem de reduzir a resistência à fadiga, não sendo apropriadas para rodovias de tráfego intenso.

Devido a essas limitações foi organizado um concurso de técnicas inovadoras em 1983-84 pelo poder público francês que resultou na introdução do *béton bitumineux très mince*, BBTM (concreto asfáltico muito delgado). Essa mistura deve ser usada em camadas com espessuras de 20 a 25mm com o objetivo de promover elevada e durável macrotextura e resistência à derrapagem sob tráfego pesado. É usada tanto em manutenção como em novas construções, especialmente na rede de auto-estradas concedidas. Esse sucesso está relacionado à introdução do conceito de “dissociação de funções” entre a camada de rolamento/desgaste e a camada de ligação. Ainda nos anos 1980, o conceito de misturas delgadas foi impulsionado com o surgimento dos *béton bitumineux ultra-mince*, BBUM (concreto asfáltico ultradelgado) – Magalhães (2004).

A necessidade de novos padrões de misturas asfálticas serviu de motivação para o desenvolvimento de novos ensaios de laboratório com o objetivo de prever a trabalhabilidade e o desempenho mecânico (resistência à deformação permanente para capa de rolamento, rigidez e resistência ao trincamento por fadiga para camadas de ligação, ensaios considerados atualmente fundamentais para o projeto de mistura a quente). Houve, desde 1970, o desenvolvimento de uma série de novos ensaios (compactador de cisalhamento giratório, o simulador de tráfego *wheel-tracking test*, módulo complexo, ensaio de fadiga), que agora compõem o método francês de misturas asfálticas baseado no desempenho (ver Capítulo 6).

A maioria das exigências para revestimentos asfálticos, que faz parte das especificações e normas francesas, baseia-se no desempenho exigido sobre o produto acabado e não sobre um método como “receita de composição”. Os diferentes revestimentos são definidos pelo tipo, posição dentro da estrutura, pela espessura média, pela graduação e pela classe de desempenho, esta determinada em laboratório pelo estudo de dosagem. As exigências sobre os agregados dizem respeito às características mecânicas (dureza, angularidade, resistência ao polimento), dimensão do agregado e propriedades dos finos (poder absorvente e rigidificante, fineza). Os agregados são totalmente britados e a composição granulométrica não é mais definida sob a forma de uma faixa a ser respeitada. Quanto aos ligantes, embora as normas francesas não façam restrições às características do ligante, que tanto pode ser um ligante puro, modificado com polímeros ou com aditivos (fibras), a dosagem mínima em asfalto é fixada através do “módulo de riqueza” que traduz uma espessura mínima de filme de asfalto sobre o agregado (Brosseaud, 2002b).

Apresenta-se na Tabela 4.14 as principais características dos revestimentos asfálticos franceses e um resumo dos requisitos a serem atendidos de algumas misturas francesas (Tabelas 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19).

No Brasil o tipo de mistura EME vem sendo estudado em laboratório, em pesquisas patrocinadas pelo CTPETRO (fundo de pesquisa gerado pelas empresas produtoras de petróleo), com recursos Finep e Petrobras, com o objetivo de introdução em breve em obras de pavimentação em locais de alto volume de tráfego. Tem sido designada de mistura de módulo elevado, tendo sido testado com ligante tipo RASF (resíduo asfáltico de penetração 10) e um ligante modificado com EVA. Detalhes podem ser vistos em Magalhães (2004) e Magalhães *et al.* (2004).

Uma descrição sucinta dos tipos de misturas a quente normatizados na França é feita a seguir (Magalhães, 2004; Ferreira, 2006):

- camadas superficiais de revestimentos espessos (BBSG, BBME) – os concretos asfálticos do tipo BBSG são os revestimentos clássicos que constituem as camadas de superfície (ligação e rolamento) com função estrutural, buscando-se ainda aderência e conforto, aplicam-se em pavimentos novos e reforços. O BBME é uma categoria particular do BBSG com rigidez e resistência à deformação permanente elevadas, além de apresentar bom desempenho à fadiga. Seu emprego está limitado aos locais sujeitos a intensas solicitações. Esses revestimentos são essencialmente produtos especiais das empresas;
- camadas superficiais de revestimentos delgados (BBM, BBTM, BBUM) – esses tipos de revestimentos são aplicados de acordo com a filosofia francesa de “dissociação de funções das camadas betuminosas” exercendo o papel funcional do revestimento com um ganho nas seguintes características: impermeabilidade, drenabilidade, aderência pneu-pavimento, conforto ao rolamento e baixo ruído. A mistura do tipo BBM é uma técnica rústica aplicada na restauração da superfície do pavimento em manutenções mais pesadas, com espessuras variando de 30 a 50mm, composição descontínua 2/6 e teor de asfalto entre 5,4 a 5,8% de ligante puro ou modificado. A técnica de BBTM tem-se tornado a mais utilizada para a manutenção dos pavimentos com tráfego rápido e elevado, aplicada em 1/3 da rede de auto-estradas e em torno de 1/4 da rede nacional francesa. Essas misturas apresentam uma descontinuidade marcante na fração 0/2, duas classes em função dos resultados na prensa de cisalhamento giratório – PCG (vazios menor que 18% para a classe 1 e entre 18 e 25% para a classe 2) e espessuras entre 20 e 25mm com excelente rugosidade superficial e manutenção da mesma ao longo do tempo. As misturas ultradelgadas – BBUM (espessura entre 10 e 15mm) são utilizadas tanto em vias urbanas (tipo 0/6 devido ao baixo nível de ruído) quanto em manutenção de rodovias secundárias (tipo 0/10) em substituição aos tratamentos superficiais. As formulações têm graduação descontínua 2/6 ou 2/4, com 5,2 a 5,5% de ligante puro ou modificado, aplicadas a uma taxa de 25 a 35kg/m²;
- camadas de revestimento intermediárias (GB e EME) – são empregadas na construção de camadas de ligação de pavimentos asfálticos espessos, estruturas mistas ou na manutenção como reforço estrutural. Os GB são usados há mais de 30 anos com agregados de dimensões máximas de 14mm e eventualmente 20mm, tratados com 3,5 a 4% de ligante geralmente 35/50. O EME mais empregado é da classe 2 devido à sua maior resistência à fadiga. Empregam-se ligantes duros de penetração 10/25 com teores de até 6%;
- misturas asfálticas drenantes (BBDr) – com vazios em torno de 20 a 22%, são aplicadas com a finalidade de eliminar água superficial, aumentar a aderência e reduzir o nível de ruído em auto-estradas e vias expressas. São aplicados teores de 4,5 a 5,2% de ligantes modificados por polímeros com espessura média de 40mm;

- ♦ tratamentos superficiais e misturas a frio – os tratamentos superficiais (*enduit superficiel* – NF P 98 160) representam a técnica mais econômica utilizada na manutenção da impermeabilização e forte macroestrutura superficial de rodovias com volume de tráfego de baixo a médio. As misturas a frio (*enrobés coulés à froid* – ECF) são misturas de agregados, emulsão asfáltica, água e aditivos e têm sido aplicadas em substituição aos tratamentos mais sensíveis à desagregação com dosagem de 12 a 14kg/m², às vezes em dupla camada na dosagem de 25kg/m².

TABELA 4.14 REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS NORMALIZADOS PELA AFNOR (SETRA e LCPC, 1994)

Sigla	Denominação	Norma	Classificação		Espessura média (mm)	
			Classe ou tipo	Granulometria		
BBSG	<i>Bétons bitumineux semi-grenus</i>	Concreto betuminoso de graduação contínua	NF P 98-130		0/10 0/14	60 a 70 70 a 90
BBM	<i>Bétons bitumineux minces</i>	Concreto betuminoso delgado	NF P 98-132	a, b, c ou d conforme gran. 1, 2 ou 3 conforme desempenho à def. perm.	0/10 0/14	30 a 40 35 a 50
BBC	<i>Bétons bitumineux cloutés</i>	<i>Hot rolled asphalt</i>	NF P 98-133	0/6 0/10	0/6 0/10	30 60
BBDr	<i>Bétons bitumineux drainants</i>	Concreto betuminoso drenante	NF P 98-134		0/10 a 0/14 0/6	40 30
BBS	<i>Bétons bitumineux pour chaussées souples à faible trafic</i>	Concreto betuminoso para estrada de pavimento flexível de tráfego leve	NF P 98-136	BBS tipo 1 BBS tipo 2 BBS tipo 3 BBS tipo 4	0/10 disc. 2/6 0/10 cont. 0/14 cont. 0/14 cont.	40 a 50 40 a 60 8 10 a 12
BBTM	<i>Bétons bitumineux très minces</i>	Concreto betuminoso muito delgado	NF P 98-137	Tipo 1 ou 2 conforme PCG	0/6 ou 0/10 ou 0/14 descontinua	20 a 25
GB	<i>Graves bitume</i>	Camada granular betuminosa	NF P 98-138	Classe 1, 2 ou 3 conforme desempenho mecânico	0/14 0/20	80 a 120 100 a 150
EME	<i>Enrobés à module élevé</i>	Mistura asfáltica de módulo elevado	NF P 98-140	Classe 1 ou 2 conforme desempenho mecânico	0/10 0/14 0/20	60 a 100 70 a 120 100 a 150
BBME	<i>Bétons bitumineux à module élevé</i>	Concreto betuminoso de módulo elevado	NF P 98-141	Classe 1, 2 ou 3 conforme desempenho mecânico	0/10 0/14	60 a 70 70 a 90

TABELA 4.15 CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS DELGADAS ($\leq 50\text{mm}$) PARA CAMADA DE ROLAMENTO (Brosseau, 2002b)

Mistura	PCG (% de vazios)	Razão r/R ¹	Porcentagem de afundamento em trilha de roda (60°C) após 30.000 ciclos
BBMa	6 – 11	$\geq 0,75$	≤ 15
BBMb	7 – 12	$\geq 0,75$	≤ 15
BBMc	8 – 13	$\geq 0,75$	≤ 15

¹ Ensaio Duriez de avaliação do dano por umidade induzida

TABELA 4.16 CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS ESPESSAS ($> 50\text{mm}$) PARA CAMADA DE ROLAMENTO (Brosseau, 2002b)

Mistura	PCG (% vazios) C60 (D 10mm) C80 (D 14mm)	Razão r/R	ATR ² (%) após 30.000 ciclos	Módulo de rigidez (15°C–10Hz) MPa	Deformação admissível em fadiga ϵ_6 (μdef)
BBSG classe 1	5 – 10 4 – 9	$\geq 0,75$	≤ 10	≥ 5.500	≥ 100
BBSG classe 2	5 – 10 4 – 9	$\geq 0,75$	$\leq 7,5$	≥ 7.000	≥ 100
BBSG classe 3	5 – 10 4 – 9	$\geq 0,75$	≤ 5	≥ 7.000	≥ 100
BBME classe 1	5 – 10 4 – 9	$\geq 0,8$	≤ 10	≥ 9.000	≥ 110
BBME classe 2	5 – 10 4 – 9	$\geq 0,8$	$\leq 7,5$	≥ 12.000	≥ 100
BBME classe 3	5 – 10 4 – 9	$\geq 0,8$	≤ 5	≥ 12.000	≥ 100

² Afundamento em trilha de roda

TABELA 4.17 CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS PARA CAMADA INTERMEDIÁRIA OU DE LIGAÇÃO (Brosseau, 2002b)

Mistura	PCG (% vazios) C60 (D 10mm) C80 (D 14 mm)	Razão r/R	ATR ³ (%) * após 10.000 ciclos ** após 30.000 ciclos	Módulo de rigidez (15°C–10Hz) MPa	Deformação admissível em fadiga ϵ_6 (μdef)
GB classe 2	≤ 11	$\geq 0,65$	$\leq 10^*$	≥ 9.000	≥ 80
GB classe 3	≤ 10	$\geq 0,7$	$\leq 10^*$	≥ 9.000	≥ 90
GB classe 4	≤ 9	$\geq 0,7$	$\leq 10^{**}$	≥ 11.000	≥ 100
EME classe 1	≤ 10	$\geq 0,7$	$\leq 7,5^{**}$	≥ 14.000	≥ 110
EME classe 2	≤ 6	$\geq 0,75$	$\leq 7,5^{**}$	≥ 14.000	≥ 130

³ Afundamento em trilha de roda

TABELA 4.18 DESEMPENHO MECÂNICO EXIGIDO PARA MISTURAS DE MÓDULO ELEVADO EME (NF P 98-140)

Ensaio do EME 0/10, 0/14 e 0/20	Classe 1	Classe 2
Ensaio Duriez a 18°C (NF P 98-251-1) Razão: r (em MPa) após imersão R (em MPa) a seco	$\geq 0,70$	$\geq 0,75$
Ensaio de afundamento de trilha de roda (NF P 98-253-1) Profundidade do afundamento em porcentagem da espessura da placa, para uma placa de 10cm de espessura, a 30.000 ciclos e a 60°C, numa porcentagem de vazios entre: • 7% e 10% (classe 1) • 3% e 6% (classe 2)	$\leq 7,5\%$ -	- $\leq 7,5\%$
Ensaio de módulo complexo (NF P 98-280-2) Módulo (em MPa), a 15°C, 10Hz e porcentagem de vazios entre: • 7% e 10% (classe 1) • 3% e 6% (classe 2)	≥ 14.000 -	- ≥ 14.000
Ensaio de tração direta (NF P 98-260-1) Determinação do módulo e da perda de linearidade numa porcentagem de vazios entre: • 7% e 10% (classe 1) • 3% e 6% (classe 2)	≥ 14.000 -	- ≥ 14.000
Ensaio de fadiga (NF P 98-260-1) Deformação relativa a 10^6 ciclos, 10°C e 25Hz e porcentagem de vazios entre: • 7% e 10% (classe 1) • 3% e 6% (classe 2)	$\geq 100 \mu\text{def}$ -	- $\geq 130 \mu\text{def}$

TABELA 4.19 DESEMPENHO MECÂNICO EXIGIDO PARA MISTURAS DE MÓDULO ELEVADO BBME (NF P 98-141)

Ensaio do BBME 0/10 ou 0/14	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Ensaio Duriez a 18°C (NF P 98-251-1) Razão: r (em MPa) após imersão R (em MPa) a seco	$\geq 0,80$	$\geq 0,80$	$\geq 0,80$
Ensaio de afundamento de trilha de roda (NF P 98-253-1) Profundidade do afundamento em porcentagem da espessura da placa, para uma placa de 10cm de espessura, a 30.000 ciclos e a 60°C, com uma porcentagem de vazios entre 5% e 8%	$\leq 10\%$	$\leq 7\%$	$\leq 5\%$
Ensaio de módulo complexo (NF P 98-280-2) Módulo (em MPa), a 15°C, 10Hz e porcentagem de vazios entre 5% e 8%	≥ 9.000	≥ 12.000	≥ 12.000
Ensaio de tração direta (NF P 98-260-1) Determinação do módulo e da perda de linearidade numa porcentagem de vazios entre 5% e 8% módulo em MPa a 15°C, 0,02s	≥ 9.000	≥ 12.000	≥ 12.000
Ensaio de fadiga (NF P 98-261-1) Deformação relativa a 10^6 ciclos, 10°C e 25Hz e porcentagem de vazios entre 5% e 8%, ϵ_6	$\geq 110 \mu\text{def}$	$\geq 100 \mu\text{def}$	$\geq 100 \mu\text{def}$

4.2.2 Misturas asfálticas usinadas a frio

Os pré-misturados a frio (PMF) consistem em misturas usinadas de agregados graúdos, miúdos e de enchimento, misturados com emulsão asfáltica de petróleo (EAP) à temperatura ambiente. Dependendo do local da obra, podem ser usadas para misturar os PMFs: usinas de solo ou de brita graduada, usinas de concreto asfáltico sem ativar o sistema de aquecimento dos agregados, usinas de pequeno porte com misturadores tipo rosca sem fim, ou usinas horizontais dotadas de dosadores especiais. Para operações de manutenção de pavimentos em uso, pode-se até lançar mão de betoneiras comuns de preferência as de eixo horizontal (IBP, 1999). Há também facilidades de se operar a mistura em usinas móveis. O processo de usinagem pode ser visto no Capítulo 8.

O PMF pode ser usado como revestimento de ruas e estradas de baixo volume de tráfego, ou ainda como camada intermediária (com CA superposto) e em operações de conservação e manutenção, podendo ser:

- denso – graduação contínua e bem-graduado, com baixo volume de vazios;
- aberto – graduação aberta, com elevado volume de vazios.

Santana (1992) ressalta os aspectos funcional, estrutural e hidráulico do PMF, que varia de acordo com o volume de vazios, e é função da granulometria escolhida. O mesmo autor define ainda o PMF como uma mistura preparada em usina apropriada, com agregados de vários tamanhos, emulsão asfáltica catiônica em geral, espalhada e compactada na pista à temperatura ambiente, podendo-se aquecer ou não o ligante, usada como camada de base ou revestimento, que pode ser executado em três categorias:

- aberto (PMFA): com pequena ou nenhuma quantidade de agregado miúdo e com pouco ou nenhum fíler, ficando após a compactação, com volume de vazios (V_V) elevado, $22 < V_V \leq 34\%$;
- semidenso: com quantidade intermediária de agregado miúdo e pouco fíler, ficando após a compactação com um volume de vazios intermediário, $15 < V_V \leq 22\%$;
- denso (PMFD): com agregados graúdo, miúdo e de enchimento, ficando após a compactação com volume de vazios relativamente baixo, $9 < V_V \leq 15\%$.

No que concerne à permeabilidade, pode-se observar:

- vazios $\leq 12\%$ – apresenta baixa permeabilidade podendo ser usado como revestimento;
- vazios $> 12\%$ – apresenta alta permeabilidade, necessitando uma capa selante caso seja usado como única camada de revestimento. Quando $>20\%$ pode ser usado como camada drenante.

Os PMFs podem ser usados em camada de 30 a 70mm de espessura compactada, dependendo do tipo de serviço e da granulometria da mistura. Espessuras maiores devem ser compactadas em duas camadas. As camadas devem ser espalhadas e compac-