



INFORMAÇÕES BÁSICAS SOBRE MATERIAIS ASFÁLTICOS

A IMPORTÂNCIA DAS CARACTERÍSTICAS
DOS AGREGADOS NO DESEMPENHO
DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Informações básicas sobre materiais asfálticos, volume 1

A importância das características dos agregados no desempenho das misturas asfálticas

Leni Mathias Figueiredo Leite

Laura Maria Goretti da Motta

Evanilda Cohim Costa

Luiz Henrique Teixeira

Armando Morilha

Lídia Dinis Martins

VERSÃO 18/10/2020

Copyright 2020. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP)

Todos os direitos reservados.



Copyright © 2020. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP)

Todos os direitos reservados ao Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP).

A reprodução não autorizada desta publicação, por qualquer meio, seja total ou parcial, constitui violação da Lei nº 9610/98 (Lei de Direitos Autorais).

Dados internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Elaborada pelo Centro de Informação e Documentação Hélio Beltrão (CID)

I34 A importância das características dos agregados no desempenho das misturas asfálticas [recurso eletrônico] / Leni Mathias Figueiredo Leite, Laura Maria Goretti da Motta, Evanilda Cohim Costa, Luiz Henrique Teixeira, Armando Morilha, Lídia Dinis Martins. – Rio de Janeiro: IBP, 2021.

191 p. : il. color. – (Informações Básicas; 2)

Formato: e-book em PDF.

Modo de acesso: www.biblioteca.ibp.org.br

ISBN: 978-65-88039-03-8

1. Agregados (Materiais de construção). 2. Misturas asfálticas – Qualidade. I. Leite, Leni Mathias Figueiredo. II. Título

www.ibp.org.br/comunidades



IBP - Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás
Avenida Almirante Barroso, 52 - 21º e 26º andares
Centro – Rio de Janeiro - RJ – CEP: 20031-918
Tel.: (+55 21) 2112-9000
e-mail: cid@ibp.org.br

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Esquema de uma estrutura de pavimento e das cargas aplicadas	15
Figura 2.1	Agregados naturais – pedra britada, areia, seixos; artificiais – escória, argila calcinada e reciclada	18
Figura 2.2	Agregados naturais – laterita	19
Figura 2.3	Resíduo de construção e demolição (RCD)	19
Figura 2.4	Exemplos de agregados, graúdo, miúdo e de enchimento, passantes por algumas peneiras	21
Figura 2.5	Comparação de granulometrias de misturas asfálticas a quente	22
Figura 3.1	Exemplo de seixos rolados empregados em revestimentos asfálticos	23
Figura 3.2	Ciclos das rochas	26
Figura 3.3	Esquema de uma análise petrográfica	27
Figura 3.4	Exemplos de lâminas petrográficas de três pedreiras de gnaissse	27
Figura 3.5	Aspectos da Pedreira Basalto S.A. – Jaguariúna (São Paulo) e suas sete bancadas	30
Figura 3.6	Esquema simplificado do processo de britagem	33
Figura 3.7	Operações de transporte de rochas na pedreira	33
Figura 3.8	Exemplos de britadores	35
Figura 3.9	Esquemas de diversos tipos de britadores	36
Figura 3.10	Rota de britagem, incluindo britagens terciárias e quaternárias	37

Figura 3.11	Exemplos de pilhas de agregados em pedreiras	38
Figura 3.12	Agregados de argila calcinada e corpos de prova do trecho experimental no campus Fundão da UFRJ (RJ)	42
Figura 3.13	Exemplo de utilização de material fresado em estradas rurais	44
Figura 3.14	Uso de fresado como parte de reciclagem de base em estradas federais	45
Figura 3.15	Operação de fresagem e reciclagem de revestimentos asfálticos e exemplos de pilhas de material fresado	46
Figura 3.16	Exemplos de obras de revestimentos asfálticos com agregados siderúrgicos	48
Figura 4.1	Definições e influências entre as características dos agregados	50
Figura 4.2	Efeito da origem da rocha e dos processos de britagem na angularidade, esfericidade e dos agregados nos vários tamanhos de partículas	51
Figura 4.3	Procedimentos tradicionais para a avaliação da forma dos agregados	52
Figura 4.4	Detalhe do ensaio de angularidade de agregados finos e valores admissíveis	54
Figura 4.5	Equipamento de processamento digital de imagem (PDI – AIMS) e exemplo de tipos de resultados fornecidos	56
Figura 4.6	Exemplos de agregados naturais com diferentes características de textura superficial e faces fraturadas	57

Figura 4.7	Esquema das medidas de massa para determinação de massa específica e densidade agregado graúdo (A – massa do agregado seco em estufa; B – massa do agregado na condição saturada superfície seca; C – massa do agregado imerso em água)	58
Figura 4.8	Determinação de densidade e absorção dos agregados miúdos	58
Figura 4.9	Passos do ensaio de densidade máxima medida da mistura asfáltica não compactada	60
Figura 4.10	Exemplo de ensaio de adesividade expedita do agregado com o asfalto (não aderido) e com dois teores de agente melhorador de adesividade (aderido)	61
Figura 4.11	Exemplos do resultado do ensaio de adesividade visual de agregados do RS	62
Figura 4.12	Ensaio de dano por umidade induzida (DUI)	64
Figura 4.13	Exemplo da ocorrência de desagregação e fendilhamento do agregado no ensaio de durabilidade (sanidade), com cinco ciclos no sulfato de magnésio.....	65
Figura 4.14	Passos do ensaio de sanidade de agregados e produtos usados.....	66
Figura 4.15	Esquema do ensaio equivalente de areia e exemplo de equipamento	67
Figura 4.16	Exemplo de repartidor de amostra de agregado, quarteamento de pilha e peneiramento	69
Figura 4.17	Exemplo de representação das granulometrias de agregados (a) individuais (b) agrupados considerando a composição pretendida (densa, uniforme, aberta, descontínua ou com degrau)	70

Figura 4.18	Granulômetro a laser para obtenção da granulometria abaixo da peneira número 100 e exemplo de resultados de quatro materiais de enchimento	72
Figura 4.19	Etapas do ensaio de azul de metileno	74
Figura 5.1	Exemplo de equipamento Los Angeles e passos do ensaio	77
Figura 5.2	Agregado após abrasão Los Angeles faixa A, LA = 83% (material indesejado)	78
Figura 5.3	Ensaio Treton: equipamento e passos do ensaio	79
Figura 5.4	Ensaio de esmagamento	80
Figura 5.5	Equipamento para ensaio de polimento acelerado de agregados	81
Figura 5.6	Equipamento para o ensaio Micro Deval de abrasão dos agregados graúdos	83
Figura 6.1	Representação gráfica de uma curva granulométrica de concreto asfáltico – um exemplo	90
Figura 6.2	Exemplos de mistura asfáltica do tipo CPA	94
Figura 6.3	Exemplo de faixa granulométrica SMA e granulometria de um projeto	97
Figura 6.4	Exemplo de corpos de prova de SMA e CA e composição granulométrica	99
Figura 6.5	Representação da faixa granulométrica GG de um projeto	100
Figura 7.1	Curvas de densidade máxima para o gráfico de gradação de potência de 0,45, cada curva é para um tamanho máximo de agregado diferente	106

Figura 7.2	Método Rothfuchs de combinação granulométrica	108
Figura 7.3	Visão geral das divisões de uma mistura de agregados de granulometria contínua pelo método Bailey	112
Figura 7.4	Massa unitária e volume de vazios dos agregados	112
Figura 7.5	Exemplos de granulometria combinada dos agregados disponíveis que definem o tipo de concreto asfáltico final	113
Figura 7.6	Exemplo de granulometria combinada dos agregados disponíveis que definem o tipo de SMA final	114
Figura 7.7	Constituintes da metodologia FAD	116
Figura 7.8	Componentes da mistura asfáltica para cálculo da porosidade FAD	117
Figura 7.9	Fluxograma do método FAD	118
Figura 8.1	Influência do agregado e do ligante no desempenho de uma mistura asfáltica	119
Figura 8.2	Processo de avaliação da compactabilidade e valores recomendados para compactação em campo	123
Figura 8.3	Área retida para cada granulometria.....	124
Figura 8.4	Exemplo de macrotextura de SMA: efeito da granulometria descontínua.....	125
Figura 8.5	Método da mancha de areia e do pêndulo britânico de avaliação de macro e microtextura de uma superfície asfáltica.....	125

Figura 8.6	Amostra de concreto asfáltico sem danos devido à umidade (esquerda) e com danos (direita), com inúmeros agregados descolados do ligante.....	126
Figura 8.7	O agregado à esquerda apresenta descolamento severo do ligante e o mesmo agregado à direita com 0,5% de agente melhorador de adesividade.....	128
Figura 8.8	Variação do MR de concreto asfáltico em função do TNM do agregado, tipo e teor de ligantes	137
Figura 8.9	Variação da RT de concreto asfáltico em função do TNM do agregado, tipo e teor de ligantes	137
Figura 8.10	Curvas de fadiga de misturas com CAP 30-45 e faixa granulométrica 9,5mm.....	141
Figura 8.11	Curvas de fadiga de misturas com CAP 30-45 e faixa granulométrica 12,5mm	141
Figura 8.12	Curvas de fadiga de misturas com CAP 30-45 e faixa granulométrica 9,0mm	142
Figura 8.13	Configuração de possíveis mecanismos de deformações permanentes em revestimentos asfálticos (densificação e cisalhamento)	143
Figura 8.14	Exemplos de defeitos de deformação permanente de concreto asfáltico devido à dosagem inadequada	143
Figura 8.15	Equipamentos de ensaio de deformação permanente de misturas asfálticas do tipo simulador de tráfego de laboratório	145
Figura 8.16	Exemplo de resultado de ensaio de deformação permanente de misturas asfálticas com o simulador LCPC, APA e Hamburg	145

Figura 8.17	Exemplo de resultado do ensaio FN	146
Figura 8.18	Valores de FN das misturas analisadas e limites propostos por autores	149
Figura 8.19	Fatores que interferem na deformação permanente de misturas asfálticas	150
Figura 9.1	Ensaio obrigatório para o concreto asfáltico para o dimensionamento pelo MeDiNa.....	152
Figura 9.2	Exemplo de dados de uma mistura asfáltica inserida no MeDiNa, para o dimensionamento e a serem atendidos na obra	154
Figura 10.1	Fotos de emissão de poeira numa instalação de britagem e forma de combate com sistema de microbolhas	156

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Peneiras usuais e dimensão da sua malha	21
Tabela 3.1	Tipos de rochas comumente usados como fonte de agregados para pavimentação no país	24
Tabela 3.2	Características das principais rochas e tipos de agregados resultantes usados para pavimentação	25
Tabela 4.1	Requisitos Superpave de percentual de partículas chatas e alongadas	53
Tabela 4.2	Requisitos Superpave de percentual de faces fraturadas para os agregados graúdos (a) e porcentagem de partículas chatas e alongadas (b)	54
Tabela 4.3	Critérios de qualificação da forma, textura e angularidade dos agregados obtidas pelo PDI propostos para os agregados brasileiros	57
Tabela 4.4	Requisitos Superpave de equivalente de areia	68
Tabela 5.1	Interpretação do ensaio de polimento acelerado da norma europeia	82
Tabela 5.2	Limites das especificações europeias para resistência mecânica	86
Tabela 5.3	Limites especiais da norma europeia para resistência mecânica	86
Tabela 6.1	Faixas granulométricas de concreto asfáltico	89
Tabela 6.2	Faixas granulométricas por TNM (proposta na revisão da especificação de serviço de concreto asfáltico feita em 2019)	90
Tabela 6.3	Faixas granulométricas indicadas para misturas tipo CPA	93
Tabela 6.4	Especificações alemãs de misturas asfálticas SMA	96

Tabela 6.5	Especificações norte-americanas de SMA	97
Tabela 6.6	Especificação de propriedades de uma mistura do tipo SMA	98
Tabela 6.7	Faixa granulométrica gap graded	100
Tabela 6.8	Faixas granulométricas para tratamento superficial duplo	103
Tabela 6.9	Faixas granulométricas para microrrevestimento asfáltico a frio	104
Tabela 7.1	Cálculos para uma curva de gradação de potência de 0,45 usando o tamanho máximo agregado de 19,0mm (0,75 polegada)	107
Tabela 7.2	Limites das proporções dos agregados com comportamento graúdo	113
Tabela 8.1	Resultados de dano por umidade induzida para diferentes agregados sem e com uso de dois tipos de cal	129
Tabela 8.2	Composição das misturas asfálticas e efeitos do tipo de filer nos ensaios mecânicos	138
Tabela 8.3	Valores de módulo de resiliência e de resistência à tração de misturas asfálticas com agregados de diferentes origens geológicas e mesma faixa granulométrica	139
Tabela 9.1	MeDiNa: FN a ser atendido em função do volume de tráfego como critério de deformação permanente na dosagem do concreto asfáltico	153
Tabela 9.2	Expressões das classes de fadiga de concreto asfáltico no software MeDiNa	153

1. Introdução	15
2. Definições básicas	18
3. Origem dos agregados	23
3.1 Agregados naturais	23
3.1.1 Pedreiras	28
3.1.1.1 Considerações iniciais	28
3.1.1.2 Tipos de britadores, peculiaridades de britagem e peneiramento	32
3.1.3 Pilhas (brita 2, 1, 0...)	37
3.2 Agregados artificiais	39
3.2.1 Agregado de argila calcinada	40
3.2.2 Agregados reciclados	42
3.2.3 Agregado siderúrgico	47
4. Características físicas dos agregados	49
4.1 Forma, textura e angularidade	49
4.2 Densidades e absorção	58
4.2.1 Densidade relativa máxima medida e massa específica máxima medida em amostras não compactadas	60
4.3 Adesividade	61
4.4 Sanidade ou durabilidade	65
4.5 Equivalente de areia	67
4.6 Análise granulométrica das frações	68
5. Características de resistência mecânica de agregados	75
5.1 Abrasão Los Angeles	75
5.2 Treton	78
5.3 Esmagamento	80
5.4 Polimento	80
5.5 Micro Deval	82
5.6 Valores admissíveis dos ensaios de resistência mecânica dos agregados	84
6. Tipos de composição granulométrica	87
6.1 Misturas asfálticas densas, semidensas e abertas	88

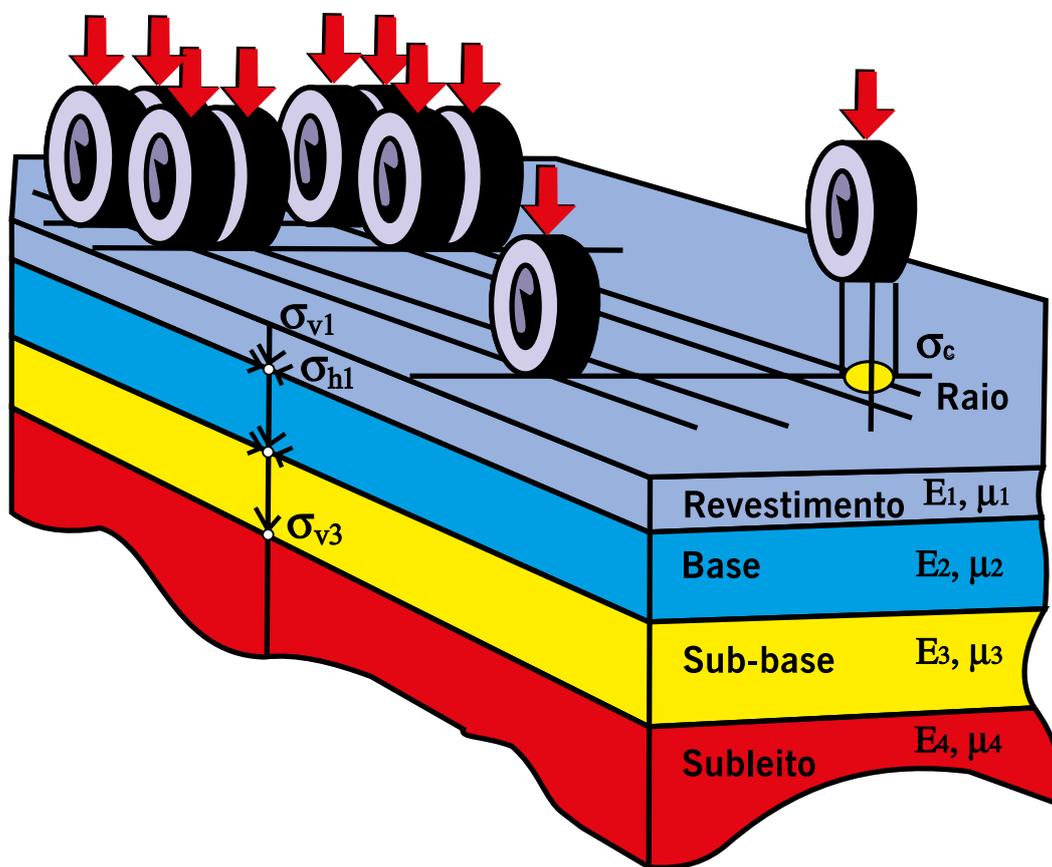
6.1.1	CPA – camada porosa de atrito ou revestimento asfáltico drenante	92
6.1.2	SMA – Stone Matrix Asphalt	94
6.1.3	Gap graded	100
6.2	Tratamento superficial	101
6.3	Microrrevestimento asfáltico a frio	103
7.	Métodos de composição granulométrica	105
7.1	Tamanho máximo do agregado	105
7.2	Curva máxima de densidade	106
7.3	Métodos de combinação de agregados	108
7.3.1	Método gráfico (Rothfuchs)	108
7.3.2	Método das tentativas	109
7.3.3	Método Bailey	110
7.3.4	Método teórico ou método de Füller-Talbot	114
7.3.5	Método da faixa de agregados dominantes (FAD)	115
8.	Efeito das características dos agregados e sua composição granulométrica no comportamento das misturas asfálticas	119
8.1	Efeito na trabalhabilidade e compactação	120
8.2	Efeito na macro, microtextura e no atrito	124
8.3	Efeito no dano por umidade induzida	126
8.4	Efeito no módulo de resiliência, no módulo dinâmico e na resistência à tração	132
8.5	Efeito na fadiga	140
8.6	Efeito na deformação permanente	142
9.	Características mecânicas de concreto asfáltico necessárias para o método de dimensionamento MeDiNa	151
10.	Aspectos de SMS	155
11.	Considerações finais	158
	Referências	159
	Anexo 1	181
	Anexo 2	190
	Anexo 3	191

1. INTRODUÇÃO

Os pavimentos rodoviários e aeroportuários são estruturas de várias camadas, compostas por materiais diversos, construídas sobre a camada final de terraplanagem que é denominada de subleito. O revestimento mais comum dos pavimentos brasileiros é composto por uma mistura de agregados e ligante asfáltico, sendo estes classicamente denominados de pavimentos flexíveis. Numa segunda etapa da vida útil de um pavimento, após alguns anos de solicitação, pode ser necessária uma nova camada de revestimento ou restaurações diversas.

Esta estrutura, indicada de forma esquemática na figura 1.1, tem a função de resistir às cargas do tráfego e às condições climáticas, atendendo ainda às características de conforto e segurança dos veículos e usuários, além de impermeabilizar a superfície, evitando que a água penetre nas camadas inferiores, geralmente mais sensíveis à variação de umidade.

Figura 1.1 – Esquema de uma estrutura de pavimento e das cargas aplicadas



Fonte: Albarnaz, 1997.

O revestimento asfáltico é a camada superior que está em contato direto com as rodas dos veículos e sujeita as intempéries. Dependendo do volume de tráfego, o revestimento pode ser composto por: camada delgada preparada in situ, denominada tratamento superficial, uma camada de rolamento ou duas (ou mais) camadas de misturas com diferentes composições granulométricas e distintos ligantes asfálticos.

Nos casos mais comuns, até um determinado volume de tráfego, um revestimento asfáltico de um pavimento novo pode ser composto por um único tipo de mistura asfáltica. Ela pode se distinguir:

- >> quanto ao local de fabricação, como obtida em usina específica (misturas usinadas) ou preparada na própria pista (tratamentos superficiais);
- >> quanto à temperatura de mistura: misturas a quente (uso de cimento asfáltico de petróleo) ou a frio (uso de emulsão asfáltica);
- >> e as misturas usinadas ainda podem ser separadas, quanto à composição granulométrica, em: densas, abertas, descontínuas ou uniformes.

Em casos de recomposição da capacidade estrutural ou funcional, além desses tipos descritos, é possível o uso 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); misturas recicladas com uso de fresadoras recicladoras.

Em geral, um revestimento asfáltico é composto, tipicamente, por cerca de 95% em massa de agregados e 5% de ligante asfáltico e eventuais aditivos. Assim, o dimensionamento de pavimentos apropriado ao clima e ao tráfego, seleção adequada desses agregados e do ligante, a dosagem da mistura asfáltica, o controle da usinagem e da aplicação na obra compõem o conjunto de atividades básicas que garante, em grande parte, o sucesso da pavimentação de uma via.

As misturas asfálticas também podem ser utilizadas em outras camadas do pavimento, que não só o revestimento, tal como camada de ligação ou camada de base.

Também é necessário, durante a dosagem, levar em conta o tipo e a qualidade do ligante asfáltico selecionado, e o atendimento aos critérios de deformabilidade, rigidez, durabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente que forem especificadas no projeto do pavimento a ser atendido.

As tensões e deformações induzidas na camada asfáltica pelas cargas do tráfego provocam o trincamento por fadiga dessa camada ou a deformação permanente, entre outros tipos de defeitos. A mistura asfáltica ainda pode apresentar envelhecimento do ligante asfáltico por ação climática, e esse fato modifica as características de comportamento mecânico da camada.

Geralmente, os defeitos de vias pavimentadas são atribuídos à má qualidade do ligante, embora esse material constitua apenas 5% das misturas asfálticas. A necessidade de se especificar melhor a qualidade dos agregados, e de se criar critérios de seleção de processos de extração e de britagem para agregados em pedreiras, não é exigida pelo meio rodoviário. As especificações desses materiais não sofrem revisão há mais de 30 anos no Brasil, embora no mundo desenvolvido novos equipamentos e métodos de ensaio tenham sido desenvolvidos para a seleção de agregados adequados à pavimentação.

O objetivo principal desta publicação é apresentar, de forma concisa e didática, os aspectos necessários de seleção de agregados para projetos das misturas asfálticas que resultem em camadas adequadas e duradouras para os pavimentos. Visa orientar sobre os pontos principais de características dos agregados a serem considerados nas dosagens, em eventuais especificações particulares ou normalização, ou ainda no diagnóstico e solução de problemas encontrados nas obras. As características dos agregados que serão analisadas são: origem, morfologia (forma, textura superficial, angularidade, circularidade), composição granulométrica, sanidade (durabilidade) e resistência mecânica.

Essas características têm influência no comportamento das misturas asfálticas, sendo discutida sua atuação na trabalhabilidade, compactabilidade, macro e microtextura da superfície que influenciam no atrito pneu-pavimento, resistência à tração, módulo de resiliência, fadiga, deformação permanente e adesividade ao ligante (essa também avaliada pelo ensaio de dano à umidade induzida).

2. DEFINIÇÕES BÁSICAS

O termo agregado é usado para indicar um material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de misturas asfálticas. Agregado é um termo genérico para as areias, os pedregulhos e as rochas minerais britadas. É possível utilizar também os agregados artificiais como as escórias de aciaria e os agregados de argila calcinada, como exemplos.

Os agregados podem ser classificados ou agrupados por sua origem ou natureza, pelo seu tamanho e distribuição dos grãos, e por características mecânicas e de forma, como elementos básicos de seleção. Outros aspectos também devem ser considerados, tais como: variabilidade, sanidade, adesividade ao ligante, dureza, resistência à abrasão ou ao choque etc.

Quanto à sua origem, os agregados são classificados como: natural, artificial ou reciclado. Na figura 2.1 mostram-se alguns desses agregados, como ilustração.

Os agregados naturais podem ser empregados em pavimentação na forma e tamanho como se encontram na natureza, ou podem ainda passar por algum processamento, como a britagem. Assim, os agregados naturais podem existir em tamanhos e formas adequados diretamente para o uso, ou podem precisar ser britados, ou seja, quando é necessário um procedimento de exploração em pedreiras e quebra em tamanhos convenientes para sua utilização. São exemplos de agregados naturais: as areias de rios ou de depósitos e os seixos rolados.

Figura 2.1 – Agregados naturais – pedra britada, areia, seixos; artificiais – escória, argila calcinada e reciclado



Fonte: Acervo dos autores.

Em algumas regiões do país onde existe falta de material rochoso, um material alternativo utilizado na construção rodoviária são as concreções lateríticas, obtidas por peneiramento e lavagem da parte fina de solo que envolve os agregados. Um exemplo desse tipo de exploração e a análise de uma mistura asfáltica preparada com este tipo de agregado de laterita pode ser visto em Macêdo (1998), Amaral (2004) e Guimarães et al. (2010), entre outros. Concreções lateríticas de duas jazidas estão mostradas na figura 2.2 (Guimarães e Motta, 2000).

Figura 2.2 – Agregados naturais – laterita



Fonte: Guimarães e Motta, 2000.

Os agregados artificiais são mais comumente os resíduos de processos industriais, tais como a escória de alto-forno e de aciaria, ou fabricados especificamente como as argilas calcinada e expandida. São vários tipos de escórias resultantes da produção do aço, mas algumas podem ter problemas de expansibilidade e heterogeneidade, devendo ter tratamento adequado para sua utilização, porém podem apresentar alta resistência ao atrito e dureza elevada. Há também a possibilidade de uso de resíduos de construção e demolição (RCD), apresentados na figura 2.3, mas, neste caso, é preciso uma seleção criteriosa, e, também, considerar que em geral são porosos e podem consumir muito ligante asfáltico, além de apresentar características heterogêneas.

Figura 2.3 – Resíduo de construção e demolição (RCD)



Fonte: Acervo dos autores.

Os agregados ditos reciclados dizem respeito ao reaproveitamento do produto de fresagem de camadas asfálticas envelhecidas, de forma geral sendo utilizados para compor uma nova camada asfáltica.

Quanto ao tamanho, os agregados são divididos em graúdo, miúdo, material de enchimento e filer, correspondendo classicamente a:

- >> graúdo – é o material com dimensões maiores do que 2,0mm, ou seja, retido na peneira número 10. São britas, cascalhos, seixos etc.;
- >> miúdo – é o material com dimensões maiores que 0,075mm (peneira de número 200) e menores que 2,0mm. São as areias, o pó de pedra etc.;
- >> material de enchimento – é o em que pelo menos 65% das suas partículas é menor que 0,075mm, correspondente ao passante na peneira de número 200, podendo ser material natural, cal hidratada, cimento Portland, cinzas etc.;
- >> filer ou pó – na literatura atual, há a tendência de se utilizar o termo filer somente para o material passante integralmente na peneira de número 200 (0,075mm). É importante essa separação porque quanto mais fino o material de enchimento, mais provável sua interação com o ligante asfáltico. Este material pode ser resultante da britagem da própria rocha, mas também, muitas vezes, trata-se de produto comercial, tal como o cimento Portland ou a cal, e outras, de resíduos diversos tais como cinzas. As partes mais finas desses materiais podem se incorporar ao ligante asfáltico, modificando-o. Na Europa, utiliza-se o tamanho de 0,063mm (peneira 170) para definir o que é filer.

Na figura 2.4 mostram-se exemplos desses tamanhos de grãos e, na tabela 2.1, a série de tamanhos de peneiras mais utilizada, com a nomenclatura usual, em polegadas e "número", e a abertura da malha quadrada correspondente em milímetros. A norma de ensaio DNIT-ME 412/2019 indica o procedimento de análise granulométrica dos agregados.

Figura 2.4 – Exemplos de agregados, graúdo, miúdo e de enchimento, passantes por algumas peneiras



Fonte: Acervo dos autores.

Tabela 2.1 – Peneiras usuais e dimensão da sua malha

Peneira	Malha (mm)
2"	50,000
1"1/2	37,500
1"	25,000
3/4"	19,000
3/8"	9,500
N4	4,750
N10	2,000
N20	0,850
N40	0,425
N60	0,250
N100	0,150
N200	0,075

Fonte: Elaborada pelos autores.

Para as misturas asfálticas também é importante definir o tamanho máximo do agregado, o que pode afetar o desempenho de várias formas. O tamanho máximo do agregado é definido como a abertura de malha imediatamente maior do que a correspondente ao tamanho nominal máximo. O tamanho nominal máximo é a maior abertura de malha de peneira que retém alguma partícula de agregado, mas não mais de 10% em peso.

Quanto à distribuição dos grãos, as misturas asfálticas podem ser agrupadas como densa, aberta, descontínua, uniforme ou tipo macadame. A figura 2.5 ilustra os tipos principais de combinação dos diversos tamanhos de agregados. No item 4 serão ilustradas cada uma dessas composições, com suas designações correntes.

Figura 2.5 – Comparação de granulometrias de misturas asfálticas a quente



Fonte: Acervo dos autores.

A distribuição granulométrica dos agregados, muito importante no comportamento dos revestimentos asfálticos, é determinada por análise por peneiramento, sendo expressa como porcentagem em massa em cada tamanho de malha de peneira.

A graduação densa ou bem graduada é aquela que apresenta distribuição granulométrica contínua em todos os tamanhos de grãos, próxima à de densidade máxima. A graduação aberta é a que tem distribuição granulométrica contínua, mas com insuficiência de material fino (menor que 0,075mm) para preencher os vazios entre as partículas maiores.

A graduação uniforme é a que possui a maioria de suas partículas com tamanhos concentrados em uma faixa bastante estreita, com curva granulométrica muito íngreme. Em geral o diâmetro máximo é o dobro do diâmetro mínimo.

A graduação com degrau ou descontínua é aquela que apresenta pequena porcentagem de agregados com tamanhos intermediários, formando um patamar na curva granulométrica correspondente às frações intermediárias.

3. ORIGEM DOS AGREGADOS

Como dito, em relação à origem, os agregados podem ser naturais, artificiais ou reciclados. Algumas considerações sobre cada tipo serão apresentadas a seguir.

3.1 Agregados naturais

As areias naturais provêm de rios ou depósitos, em geral. Podem ser utilizadas como existentes na natureza desde que não contenham percentuais elevados de argila e nem de matéria orgânica. Eventualmente podem ter textura lisa, o que pode não ser conveniente.

Também podem ser utilizados os seixos rolados, que devem ser britados para garantir superfícies rugosas e angulosas. Na Região Norte do país, devido à carência de pedreiras, é comum o uso de seixos rolados. Alguns estudos mostram resultados de comportamento de misturas asfálticas feitas com esse tipo de agregado, como, por exemplo, Souza e Motta (2008) e Pazos (2015). Exemplos desse tipo de agregado estão na figura 3.1.

Sempre que possível, é preferível utilizar os agregados britados que provenham das pedreiras, mesmo na dimensão de areia, tendo em vista que as areias provenientes do pó de pedra das pedreiras são em geral mais angulosas.

As características físicas dos agregados são determinadas pela rocha de origem, mas a britagem pode afetar significativamente a qualidade dos agregados, por exemplo pelo efeito na forma da partícula e na graduação do agregado. Nas tabelas 3.1 e 3.2 são indicados os tipos de rocha mais comumente usados para misturas asfálticas no Brasil, por duas formas de apresentação. Na figura 3.3 há um esquema bem simplificado da formação das rochas, dos agregados naturais e dos solos.

Os tipos de rocha têm impacto na qualidade dos agregados gerados pela britagem. A geologia pode ajudar na seleção de locais de exploração, na verificação da homogeneidade e uniformidade em toda a extensão e profundidade de uma pedreira.

Figura 3.1 – Exemplo de seixos rolados empregados em revestimentos asfálticos



Fonte: Souza e Motta, 2008.

Tabela 3.1 – Tipos de rochas comumente usados como fonte de agregados para pavimentação no país

Denominação	Descrição
Andesito	Variedade de diorito vulcânico de granulação fina
Basalto	Rocha básica de granulação fina, usualmente vulcânica
Conglomerado	Rocha constituída de blocos arredondados ligados por cimento natural
Diorito	Rocha plutônica intermediária, constituída de plagioclásio com horblenda, augita ou biotita
Gabro	Rocha plutônica básica de granulação grossa, constituída de plagioclásio cálcico e piroxênio, algumas vezes com olivina
Gnaisse	Rocha riscada, produzida por condição metamórfica intensa
Granito	Rocha plutônica ácida, constituída principalmente de feldspatos alcalinos e quartzo
Calcário	Rocha sedimentar, constituída principalmente de carbonato de cálcio
Quartzito	Rocha metamórfica ou sedimentar constituída quase que totalmente por grãos de quartzo
Riolito	Rocha ácida, de granulação fina, usualmente vulcânica
Sienito	Rocha plutônica intermediária, constituída de feldspatos alcalinos com plagioclásios, horblenda, biotita ou augita
Traquito	Variedade de sienito de granulação fina, usualmente vulcânico

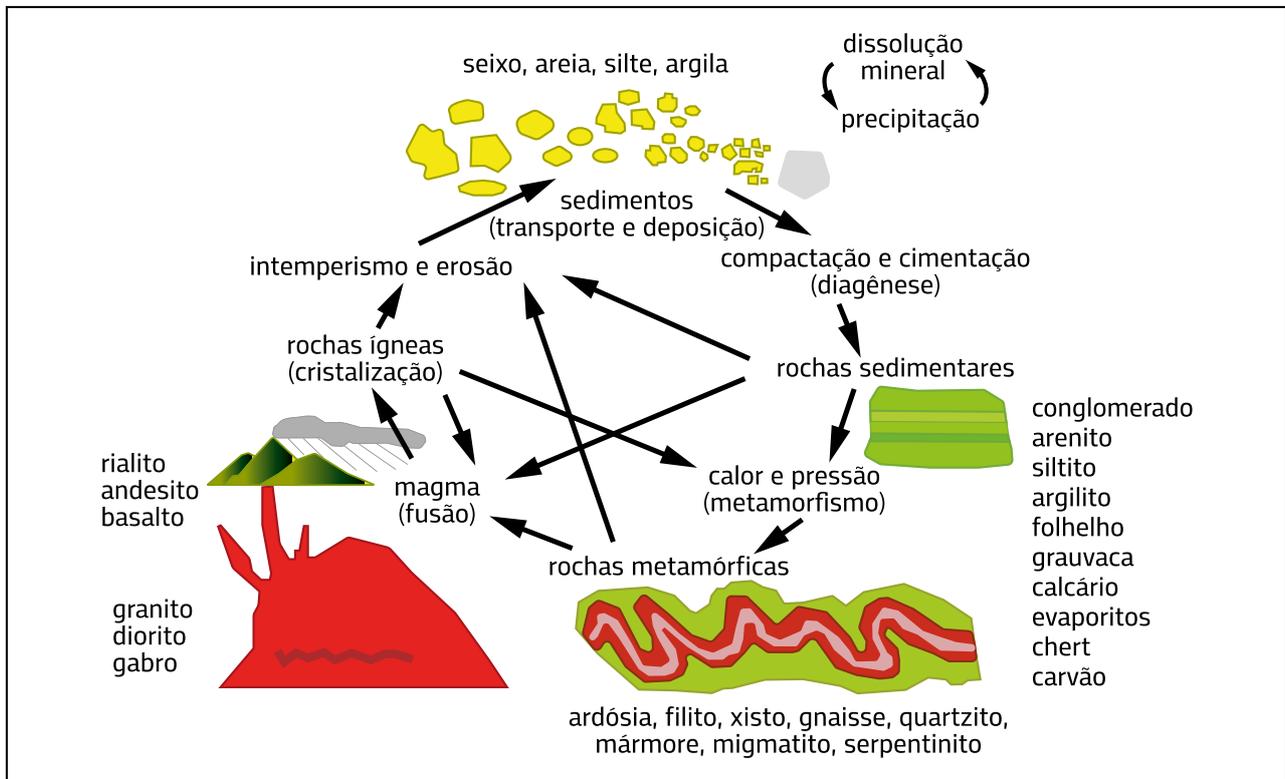
Fonte: Bernucci et al., 2010.

Tabela 3.2 – Características das principais rochas e tipos de agregados resultantes usados para pavimentação

Denominação	Origem	Variedade e associações	Observações quanto aos agregados resultantes
Granito	Magmática plutônica	Famílias: granitos, adamelitos, granodiorito. Variedades: aplito, pegmatito, sienitos, tonalito.	Podem apresentar elevada acidez, prejudicial à adesividade com o asfalto, seus fragmentos são pouco lamelares, apresentando boa quantidade de finos após a britagem.
Basalto e diabásio	Magmática eruptiva	Família: grabo. Variedades: maciços e vesiculares. Basalto: extrusivo. Diabásio: intrusivo.	Apresentam pH básico. Seus fragmentos tendem a apresentar lamelaridade, resultando também poucos finos de sua britagem. As variedades vesiculares são muito porosas, exigindo cuidados na dosagem de misturas com ligantes asfálticos. Apresentam maior dificuldade de britagem.
Calcário	Sedimentar ou metamórfica	Variedades: calcífero, dolomítico, dolomita, magnesiano. Sedimentares: de origem orgânica ou clástica. Metamórficos: mármore e giz.	Resultam em britas de boa forma, com boa adesividade e finos de boa qualidade. Apresentam facilidade de britagem. Uma desvantagem do emprego de agregado calcário, em revestimentos de pavimentos, é o rápido polimento, ao qual a superfície fica sujeita pela ação do tráfego.

Fonte: Balbo (2007) apud Brondini (2019).

Figura 3.2 – Ciclos das rochas

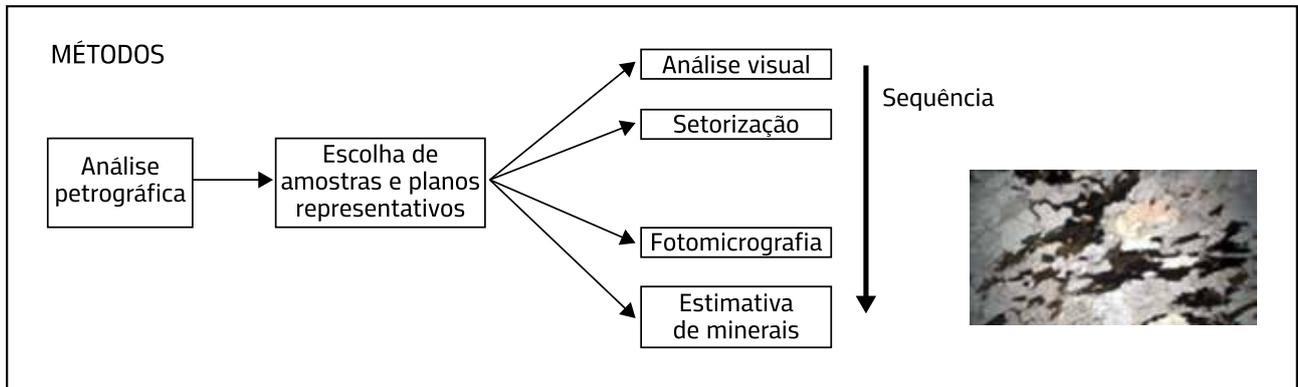


Fonte: *Dicionário de Geociências.*

Recomenda-se a análise petrográfica periódica dos vários componentes da pedra. A instrução de ensaio IE 006/2018 – DNIT detalha os procedimentos para a realização desta análise a partir de lâminas especialmente preparadas. O esquema de interpretação de uma análise petrográfica está representado na figura 3.3, que indica os passos a serem seguidos, sendo a descrição da amostra a ser ensaiada a seguinte:

"As amostras de rocha devem ser selecionadas por um geólogo de modo que sejam representativas do material que será utilizado na construção rodoviária. A amostragem para a análise microscópica deve ser feita após prévia descrição macroscópica de campo. O número de amostras deve estar diretamente relacionado ao número de litotipos presentes na frente de lavra do maciço rochoso. A escolha das amostras deve ser realizada com o auxílio de uma lupa, para verificação. Cada litotipo deve ser identificado de acordo com a sua frequência de ocorrência na frente de lavra do maciço, de preferência com a sua área de ocorrência indicada em registros fotográficos. As amostras que serão utilizadas para confecção de lâminas petrográficas deverão ter dimensões mínimas equivalentes ao material retido na peneira de tamanho 37,5 mm".

Figura 3.3 – Esquema de uma análise petrográfica



Fonte: Acervo dos autores.

Figura 3.4 – Exemplos de lâminas petrográficas de três pedreiras de gnaiss

Descrição	Nicóis descruzados	Nicóis cruzados
Material 1 Cristais imperfeitos Contatos irregulares Granulação: média/fina Biotitas orientadas 21% biotita		
Material 2 Cristais bem formados Contatos regulares Granulação: média/fina 1% biotita		
Material 3 Cristais imperfeitos Contatos irregulares Granulação: fina 6% biotita		

Fonte: Rosa et al., 2019.

3.1.1 Pedreiras

3.1.1.1 Considerações iniciais

A qualidade da rocha, a forma de exploração e britagem e, principalmente, sua homogeneidade são alguns dos pontos nevrálgicos para a qualidade da mistura asfáltica.

Em uma obra de pavimentação, a visita à pedreira e à britagem para observar como são obtidos os agregados, a serem utilizados nas misturas asfálticas, é uma das tarefas mais importantes do engenheiro no início de suas atividades e, sempre que possível, com ajuda de um geólogo.

Inicialmente, a rocha deve ser avaliada em termos de qualidade. Ao se explorar uma futura pedreira ainda virgem, devem ser extraídos testemunhos de rocha a várias profundidades para sua avaliação em termos de dureza, resistência às intempéries, altura de coluna, volume explorável, espessura da decapagem etc. A homogeneidade da rocha também deve ser avaliada. Muitas vezes o manto superior da pedreira é mais intemperizado e produz rocha mais degradável.

Como as rochas têm impacto na qualidade dos agregados gerados pela britagem, deve-se tomar cuidado na análise da pedreira, feita por um geólogo experiente, com visitas periódicas e descrição detalhada da frente de lavra, observando a homogeneidade, veios, intrusões, presença de mica, minerais expansivos etc. Dificilmente uma pedreira é uniforme em toda a sua extensão e profundidade.

A decapagem da pedreira, ou seja, a limpeza do seu topo onde ocorre a presença de solos ou rochas mais brandas de topo, é a atividade precípua para garantir uma rocha mais "sã". Muitos problemas nas misturas asfálticas começam no desmonte da bancada com rocha contaminada por solo. Nesta situação, a rocha britada apresentará material não inerte em sua composição que pode causar sérios riscos à estabilidade e à durabilidade da mistura frente ao tráfego e às intempéries.

A pedreira, em forma bruta, depois de qualificada em termos de aplicação, passa para o projeto de exploração. É necessário, neste momento, considerar o tipo de rocha visando à montagem da britagem e seus periféricos. Muitas vezes rochas mais ácidas, com maior porcentagem de cristais de quartzo, necessitam de revestimentos de britadores mais resistentes tendo em vista o desgaste que este tipo de rocha causa nos equipamentos.

Os equipamentos de britagem apresentam especificidades, e devem ser projetados em layout detalhado baseado no tipo de rocha a britar, dimensões dos blocos, cubicidade etc.

A exigência de agregados com forma mais cúbica, visando incrementar a resistência mecânica das misturas asfálticas, é cada vez mais importante. Neste caso a utilização de britadores do tipo vertical shaft impactor (VSI) é obrigatória para alguns tipos de rocha e de operação de britagem.

Rochas muito lamelares, notadamente basálticas, necessitam em geral de rebritagem terciária, mais que as rochas graníticas, por exemplo, que em condições normais apresentam menor grau de lamelaridade.

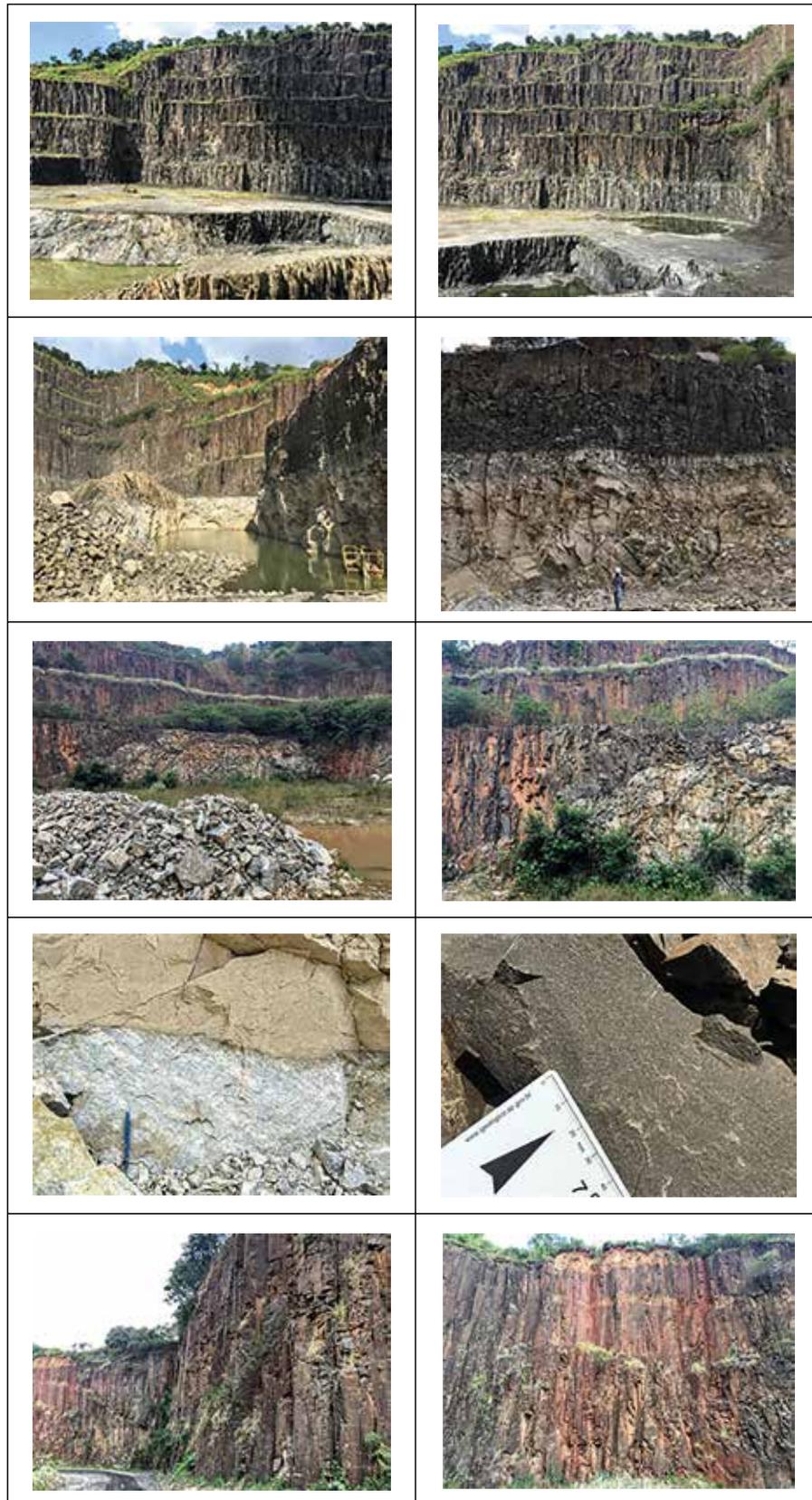
Existe uma série de tipos de britadores para serem utilizados, mas infelizmente as britagens comerciais privilegiam bitolas de agregados ou peneiramento em que se maximiza a obtenção de agregados mais graúdos para fabricação de concreto de cimento Portland.

No caso específico de construção de revestimentos de pavimentos, são necessários agregados de dureza e sanidade diferenciados, bem como formato adequado em termos de cubicidade, para que possam ter intertravamento para formar misturas asfálticas menos permeáveis e mais resistentes.

Alguns exemplos de pedreiras comerciais em atividade estão na figura 3.5 e no Anexo 1, com detalhes de cada uma ressaltados em descrição feita por geólogo. Na figura 3.5, as fotos ilustram aspectos de uma pedreira de basalto, e a descrição das imagens, de cima para baixo, são as seguintes (Trotta, 2020):

- a) vista geral;
- b) heterogeneidade vertical marcada pelo contato dos basaltos da Fm. Serra Geral com o embasamento metamórfico. As imagens foram obtidas no fundo da mina marcando sua porção mais baixa e comprovando a situação geológica sob a qual os basaltos são explorados na região de Jaguariúna;
- c) alto estrutural do embasamento sobre os quais os basaltos ocorrem. Diques de diabásio sugerem origem confinada, em vez de derrames propriamente ditos;
- d) as imagens de detalhes ilustram o gnaiss do embasamento com a zona de alteração de contato com o basalto e um bloco com textura fina (afanítica) do basalto;
- e) padrão colunar típico de unidades basálticas. É possível observar também a pedogênese do material sobre as colunas da bancada superior, o que confere cor vermelha ao material sotoposto;
- f) padrão colunar do basalto e o persistente diaclasamento observável no material fresco por toda a frente de lavra.

Figura 3.5 – Aspectos da Pedreira Basalto S.A. – Jaguariúna (São Paulo) e suas sete bancadas



Fonte: Trotta, 2020.

As peneiras vibratórias, ou os "peneirões", que separam normalmente a brita 1, o pedrisco e o pó de pedra devem ser eficientes para garantir a homogeneidade de cada fração peneirada. Peneiras mal dimensionadas em relação à britagem que as alimenta, podem gerar britas de tamanhos diversos na mesma pilha e até mesmo contaminação por pó nas rochas de "bitola" maior.

Enfim, o dimensionamento de britagem deve levar em conta não só a produção, mas a compatibilidade entre seus diversos equipamentos (calha vibratória, britadores primários, correias transportadoras, britadores secundários, terciários etc.).

A rebitagem é o processo de nova britagem de uma determinada fração de agregados no mesmo sistema, feita para maximizar a obtenção dos agregados no gabarito desejado. Esses processos devem ser integrados ao sistema de forma a manter a homogeneidade do produto obtido no "peneirão" final. No caso do pó de pedra, este pode ter sua quantidade incrementada de forma não adequada, quando os rebitadores e VSIs aumentam a quantidade de finos no pó de pedra. O excesso de finos contribui para desbalancear o sistema fíler-betume e pode impactar a obtenção do volume de vazios adequado da massa asfáltica.

Cabe ao engenheiro de pavimentação o reconhecimento da origem e da forma de fabricação da brita para compreender e prever alternativas diante de dificuldades no fornecimento de agregados na região da obra. O engenheiro de pavimentação não precisa ser um especialista em britagem, mas deve procurar entender seu funcionamento para obter produtos de britagem adequados e mais homogêneos.

Os agregados oriundos da britagem convencional podem carecer de ajustes no seu tamanho e mesmo na sua granulometria. Porém, as britagens estão evoluindo muito, tanto em termos de produção como em precisão. É possível instalar inversores de frequência nos britadores para reduzir ou aumentar a quantidade de finos no pó de pedra.

Muitas vezes explora-se uma pedreira em que a rocha não é a mais adequada em termos de qualidade. Por exemplo, rochas de absorção elevada encarecem sobremaneira a produção de concreto asfáltico (CA) devido a sua porosidade que leva a um consumo maior de asfalto na mistura. Nesta situação também existe o risco de redução de qualidade da massa pela dificuldade de se extrair a umidade do fundo dos poros dos agregados antes da mistura.

Em termos de produto (brita), a constância de forma e granulometria depende da boa operação dos britadores, e do monitoramento da manutenção e do desgaste de sua mandíbula e dos revestimentos internos dos cones, para que a variação dos agregados esteja dentro do aceitável.

Eventualmente, brita-se de uma forma para elaboração adequada das dosagens de concreto asfáltico (CA) e durante a operação regular, no dia a dia, a forma de britagem é alterada sem aviso prévio conduzindo a agregados com características diferentes daqueles para os quais a dosagem foi realizada. Essas alterações podem desbalancear as relações volumétricas da mistura asfáltica inicialmente projetada. Isto pode conduzir a massas compactadas na pista que apresentam problemas de excesso ou falta de ligante, que podem comprometer deformação permanente (excesso) ou a vida de fadiga (falta) dessa mistura, entre outros problemas de qualidade e durabilidade.

Na prática, observa-se que a grande dificuldade no dia a dia é produzir industrialmente de forma constante a mistura asfáltica inicialmente projetada. Para isto a operação da pedreira, da britagem e da usina de asfalto deve ser ajustada e controlada com rigor.

A aceitação dos agregados deve ser constantemente avaliada. A avaliação do equivalente de areia que permite constatar a pureza da rocha em termos de contaminação por não inertes deve ser mantida diariamente.

No tocante à forma dos agregados, os ensaios de lamelaridade devem ser repetidos a cada 15 dias, ou quando houver mudança visível no material, por isso as granulometrias individuais devem ser avaliadas diariamente. Recomenda-se a criação de uma faixa de trabalho de recebimento de agregados que deve ser atendida pelo produtor da brita e serve de parâmetro de aceitação do material inicialmente.

Somente os ensaios do material pétreo não bastam: a observação e delimitação da bancada de rocha a ser explorada deve ser foco de atenção permanente. Rochas de um maciço para outro podem apresentar variação de densidade significativa. Além disso, contaminações por rochas friáveis dentro do maciço ou mesmo argilominerais expansivos devem ser verificadas regularmente, acompanhadas, avaliadas e feita a análise de risco.

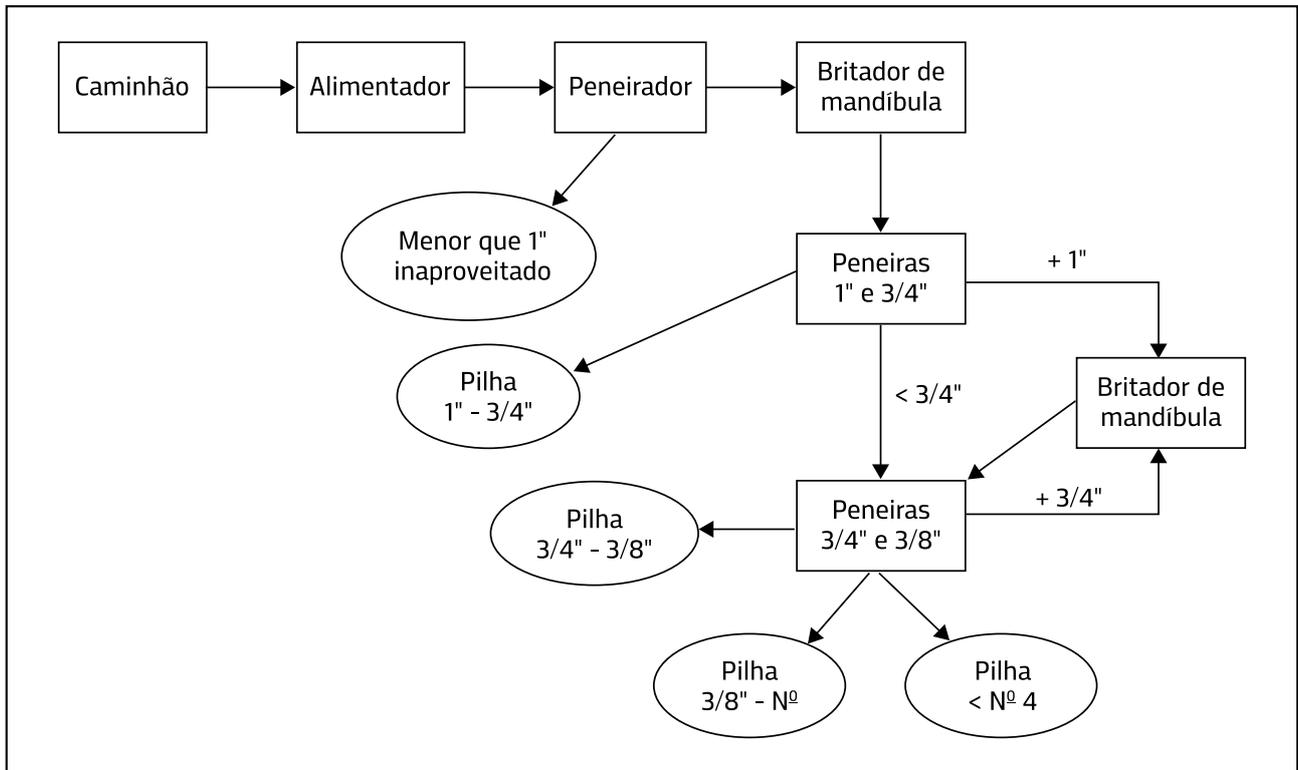
O engenheiro de pavimentação deve estar consciente de que uma pedreira pode apresentar variações e intercorrências variadas e, por isso, deve ser constantemente avaliada, bem como a britagem, tendo em vista a interface inseparável entre a rocha que será desmontada e britada e a brita produzida efetivamente.

3.1.1.2 Tipos de britadores, peculiaridades de britagem e peneiramento

O propósito básico da exploração de uma pedreira é o desmonte da rocha sã por meio de explosivos e, utilizando uma série de britadores e outras unidades, reduzir o material de modo a produzir os agregados utilizáveis na execução de um pavimento. Também é desejável produzir agregado britado que tenha formato cúbico e não achatado ou alongado (Bernucci et al., 2010).

A figura 3.6 mostra o esquema do processo de operação em uma instalação de britagem que usa um britador de mandíbula como britador primário e um britador de cone como secundário. Existe grande número de tipos de britadores, nem todos são referenciados aqui e deve ser buscada literatura especializada.

Figura 3.6 – Esquema simplificado do processo de britagem



Fonte: Bernucci et al., 2010.

Para o manuseio do material de mineração, como já exposto na definição de britagem, são necessárias operações para reduzir o tamanho das rochas para permitir que sejam transportadas.

A malha de detonação e a utilização de equipamentos especializados são utilizados para permitir que a rocha resultante possa ser transportada e britada de forma primária normalmente por meio de britadores de mandíbulas. Na figura 3.7 são mostradas as operações de transporte das rochas dentro de uma pedreira.

Figura 3.7 – Operações de transporte de rochas na pedreira



Fonte: Acervo dos autores.

Nos britadores de mandíbulas, como o próprio nome indica, as rochas são reduzidas pela energia gerada na compressão das mandíbulas. Nos britadores secundários, da família dos giratórios, a energia é aplicada por compressão entre o manto e o cone. A fratura acontece ao longo do plano principal de cisalhamento. Já nos britadores por impacto a energia cinética do impactor é aplicada à partícula e ocorre a fratura (Chaves et al., 2012).

A seleção de britadores depende de algumas exigências para determinar o tamanho do equipamento a ser escolhido. Para tanto devem ser avaliados os seguintes critérios (Chaves et al., 2012):

- >> condição de recepção: o britador deve ter dimensões internas capazes de deixar passar o fragmento máximo de alimentação;
- >> critério de Taggart que estabelece referência para se optar por britadores de mandíbulas ou giratórios;
- >> condição de processo: o conjunto de britagem deve gerar a distribuição granulométrica desejada; e
- >> sua capacidade: o britador tem uma capacidade que varia com seu tamanho e, para cada tamanho, com sua abertura.

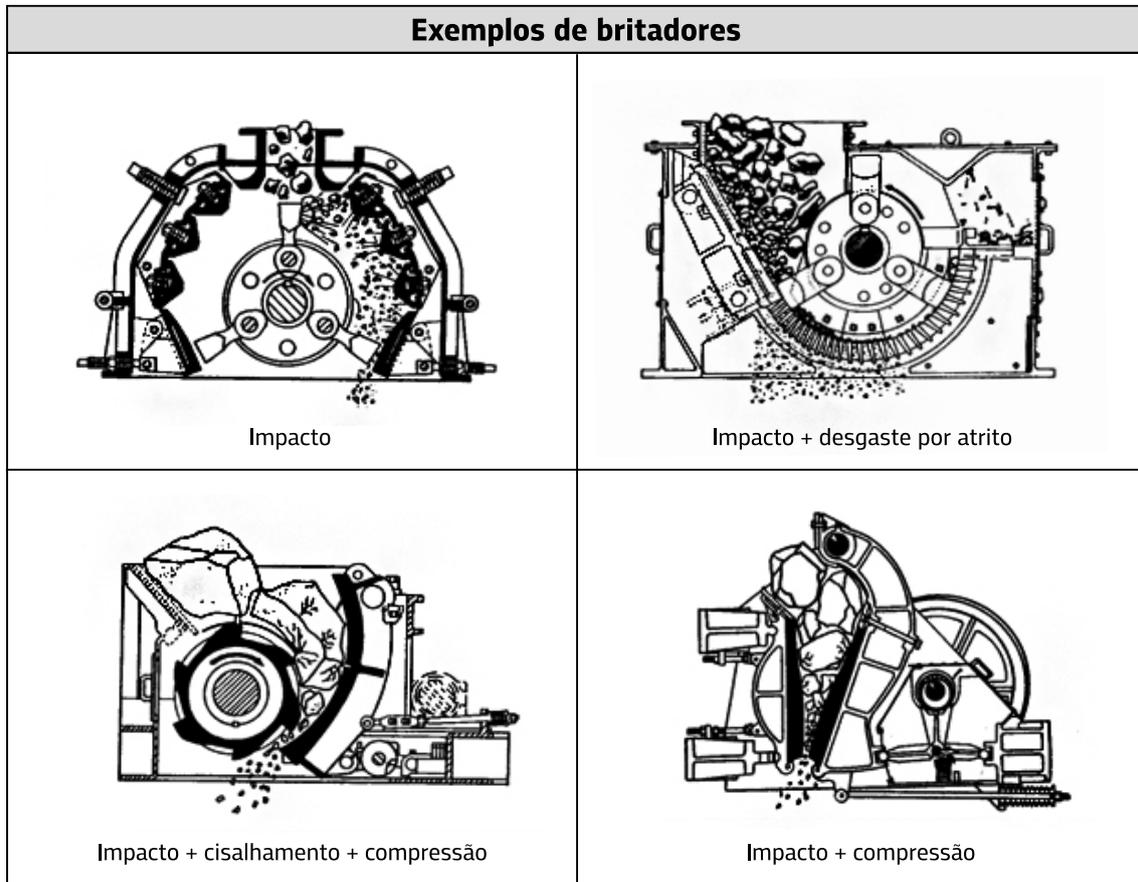
Na figura 3.8 são mostrados exemplos de britadores. Vários estudos têm sido feitos atualmente para mostrar os efeitos dos diversos tipos de britadores na morfologia dos agregados, que também é influenciada pela origem da rocha, claro, mas os esforços de britagem têm efeito marcante na forma final dos agregados. Alguns desses trabalhos de referência são: Diógenes (2015); Cavalcanti (2016); Ibiapina et al. (2017); Diógenes et al. (2016, 2018); Diógenes (2018); Trotta (2020), entre outros.

Mais recentemente, vem sendo utilizado o britador de impacto de eixo vertical ou vertical shaft impactor (VSI), representado pelos britadores Barmac, Tornado, Camica e Synchro Crusher, entre outros. Esses britadores são utilizados na britagem terciária e quaternária e trazem uma evolução de britagem induzindo ao impacto de rocha contra rocha (Chaves et al., 2012) para melhorar a cubicidade dos agregados. Na figura 3.9 mostram-se esquemas desse tipo de britador e outros.

Quando os agregados são lamelares ou quando se deseja maior cubicidade, por exemplo, há necessidade de incluir mais britadores no processo de britagem, denominados britadores terciários e quaternários, e, desse modo, a rota passa a ser a descrita na figura 3.10.

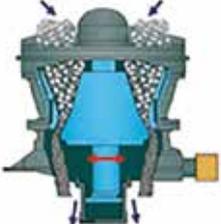
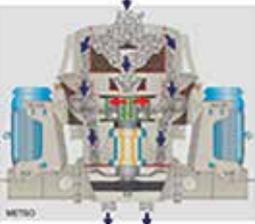
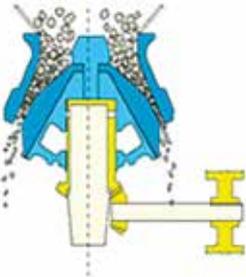
As ações de britagem são secundadas pelo peneiramento. Ele atua na separação dos materiais para a formação de pilhas que serão descritas no próximo item. São utilizadas peneiras vibratórias modulares cujas dimensões e eficiência de peneiramento são decisivas para que a separação dos materiais seja efetiva. Peneiras subdimensionadas e excesso de umidade dos materiais normalmente são complicadores para que a granulometria dos materiais, notadamente do pó de pedra, seja mantida de forma homogênea e constante (Chaves et al., 2012).

Figura 3.8 – Exemplos de britadores



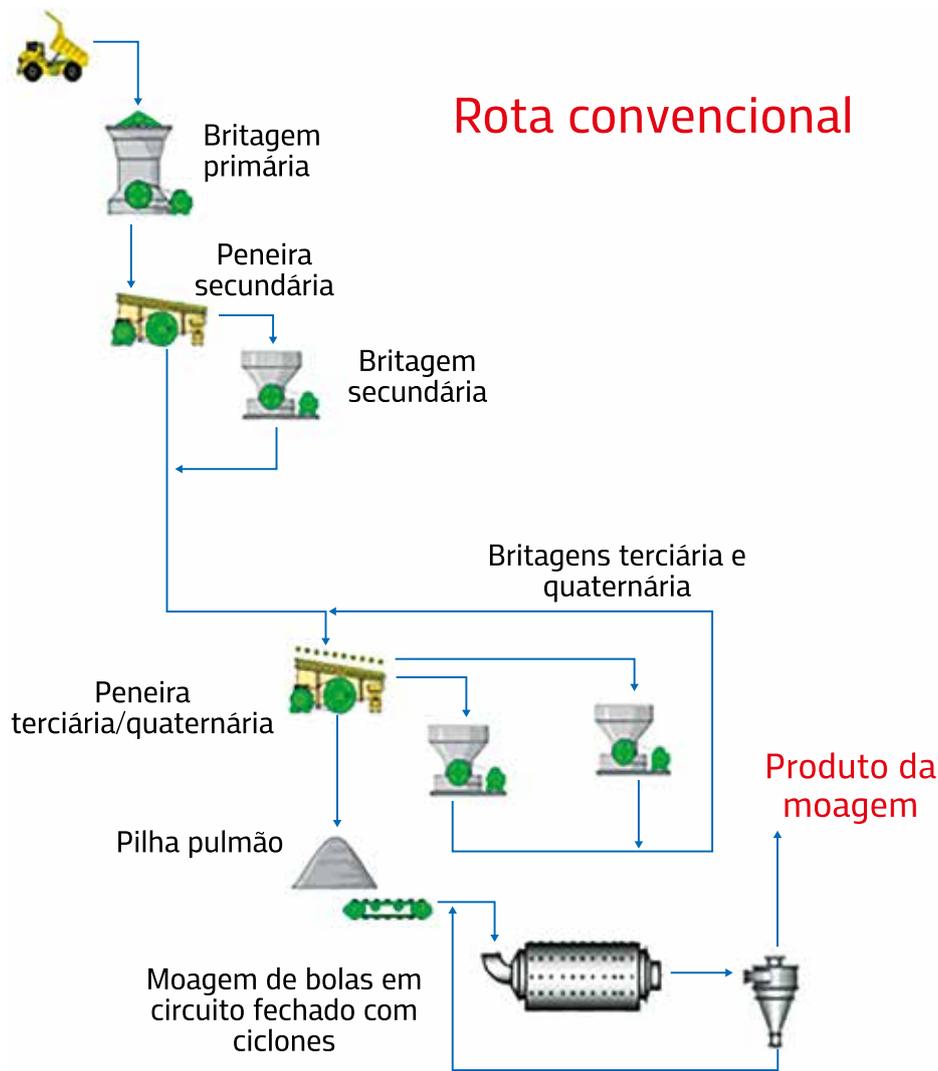
Fonte: Bernucci et al., 2010.

Figura 3.9 – Esquemas de diversos tipos de britadores

Tipos de britadores		
<p>OBTENÇÃO DE AGREGADOS - BRITAS</p>  <p>Britadores secundário e terciário - giratório ou cônico</p>	<p>OBTENÇÃO DE AGREGADOS - BRITAS</p>  <p>Britador quaternário Impactores VSI Barmac série VI</p>	
	 <p>VSI</p>	
 <p>Giratório primário</p>	 <p>Mandíbulas</p>	 <p>Impacto</p>
 <p>Cônico</p>	 <p>Eixo vertical de impacto (VSI)</p>	 <p>Rolos de alta pressão</p>

Fonte: Acervo dos autores.

Figura 3.10 – Rota de britagem, incluindo britagens terciária e quaternária



Fonte: Pinto, 2016.

3.1.1.3 Pilhas (brita 2, 1, 0...)

A rocha após seu desmonte é carregada por grandes escavadeiras e transportada para os britadores por caminhões fora de estrada – especializados para este transporte mais bruto e pesado. A seguir, este material em forma de blocos de rochas de grande tamanho, em função do tamanho do espaçamento da mandíbula do britador primário, é descarregado em uma calha vibratória que conduz a rocha para a entrada deste britador, conforme foi mostrado na figura 3.6. Antes da passagem da rocha pelo britador primário ou imediatamente após, normalmente existe uma grelha ou peneira de escalpe que serve para retirada de material mais intemperizado, fraco ou muito fino de forma que o material a ser britado seja o mais são e íntegro possível.

O britador de mandíbula quebra a rocha de forma que os demais britadores possam processá-la. Após a britagem primária, o material passa por um estágio de britagem mais especializado em função do tipo de rocha e em função do tamanho e forma das frações que se deseja obter.

Normalmente, após a britagem primária, os agregados são selecionados em vários tamanhos, como exemplo cita-se:

- >> o material maior que 1" (25,4mm) é colocado no britador de cone para britagem adicional;
- >> o material menor que 1" e maior que 3/4" (19,1mm) é estocado;
- >> a graduação menor que 3/4" passa por um processo de peneiramento e é estocada em três pilhas separadas:
 - material entre 3/4" e 3/8" (9,5mm) conhecido em vários locais como brita 1;
 - material entre 3/8" e 3/16" (#4 ou 4,8mm) conhecido como "pedrisco" ou brita 0; e
 - pó de pedra que é o material graduado abaixo da peneira 3/16".

O material acima da peneira 3/4" é conhecido como brita 2 e mesmo brita 3 dependendo do fracionamento realizado. Agregados acima de 2" são conhecidos como macadame ou rachão.

Esta descrição é simplificada e as variações de britagem e peneiramento são dependentes do tipo de serviço em que esses agregados são utilizados. Existem britagens com máquinas terciárias com o objetivo de tornar os agregados mais cúbicos, separações de finos e fabricação de areia artificial, malhas de peneiras diferenciadas etc.

Na figura 3.11, por exemplo, mostram-se algumas pilhas de agregados em uma pedreira convencional.

Figura 3.11 – Exemplos de pilhas de agregados em pedreiras



Fonte: Acervo dos autores.

3.1.1.4 Critérios de seleção das pedreiras

Normalmente as pedreiras são selecionadas sob dois aspectos principais: a proximidade da obra a ser atendida e a qualidade do material. Evidente que estes aspectos buscam verificar a disponibilidade, custo e tipo de aplicação também.

Após a elaboração do projeto estrutural do pavimento, o projetista deve verificar in loco as pedreiras existentes dentro do raio de ação em que o binômio custo x qualidade seja alcançado. Muitas vezes as pedreiras são indicadas apenas pelo seu custo de transporte mais baixo. O custo de transporte é um item importante na definição de escolha de pedreiras, mas não pode ser o único.

Muitas vezes as pedreiras mais próximas não são as mais indicadas para utilização em pavimentação, notadamente como aplicação em revestimento, quando os agregados devem apresentar maior dureza, qualidade e resistência ao intemperismo por estarem em contato direto com o tráfego e as ações do clima.

Outra característica importante se refere às características da rocha quanto à quantidade de finos e porosidade. Determinados agregados e sua forma de britagem podem conduzir a materiais que não oferecem as melhores características para sua aplicação como revestimento.

Portanto, a escolha de uma pedreira deve levar em conta sua qualidade pela realização dos ensaios que serão listados no capítulo 4, que definem os critérios de aceitação dos materiais. Além disso, sua uniformidade de bancadas e histórico de utilização também são itens importantes para sua seleção. Pedreiras com histórico de insucessos em sua utilização e com variação de materiais em termos de composição e densidade ao longo da bancada podem ser potencialmente complicadas para utilização em pavimentação asfáltica dentro dos preceitos de qualidade que são necessários.

As normas europeias EN 13043, Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação, requerem dos produtores de agregados um controle de produção, estabelecendo uma frequência de realização de ensaios que o produtor deve seguir para garantir a qualidade dos seus produtos. São quatro tabelas no item B.5.3, onde se relacionam os ensaios e a frequência mínima. No caso de agregados graúdos e miúdos, as propriedades relativas a desgaste, abrasão e polimento devem ser determinadas anualmente, mas as propriedades relacionadas à granulometria, forma, percentual de partículas britadas e angularidade devem ser feitas mensal ou semanalmente. O mesmo ocorre com o fíler, onde as propriedades relativas à sua composição química e poder rigidificador (vazios de Rigden e delta de ponto de amolecimento do mástique) são exigidas anualmente, mas as propriedades relacionadas à granulometria e à regularidade de produção são requeridas semanalmente.

3.2 Agregados artificiais

A maioria das misturas asfálticas é produzida com agregado de rocha britada, mas cresce a tendência para o uso cada vez maior de agregado artificial ou reciclado como substituto da brita, no todo ou em parte, geralmente por razões econômicas ou ambientais.

Os agregados artificiais são aqueles resultantes de processos diversos que deram origem a grãos que apresentam características físicas e mecânicas adequadas para uso em misturas asfálticas, podendo substituir total ou parcialmente os agregados naturais.

Os tipos mais comuns que têm sido empregados com sucesso, desde que sejam tomadas todas as precauções para a garantia de qualidade, são: agregado de argila calcinada, agregado siderúrgico e agregados reciclados.

Os agregados reciclados são derivados de materiais reprocessados previamente utilizados em serviços de construção. As maiores fontes são os resíduos de construção e demolição (RCD) e resíduos da manutenção rodoviária, especialmente de fresagem (RAP). A qualidade do agregado reciclado depende da qualidade dos materiais processados, da seleção e do processo de separação empregado. Devido a sua heterogeneidade, são empregados com sucesso em camadas de base e devem ser evitados nas camadas de revestimento.

Os agregados secundários são subprodutos de outros processos industriais, tais como a escória metalúrgica, a cinza volante (cinza de queima de carvão ou de lixo), borracha de pneus inservíveis, areia de fundição, lodo de tratamento de água e esgoto, lastros ferroviários degradados, resíduo de rochas ornamentais etc. Vários destes têm potencial quando avaliados em laboratório. Muitas referências listadas tratam de resíduos diversos. Em alguns destes materiais são necessários ensaios especiais para garantir a aplicabilidade ambiental. A norma NBR 10004/2004 permite classificar os resíduos sólidos em diferentes níveis de periculosidade, considerando possíveis riscos ambientais e à saúde pública.

Até agora, a maior parte das especificações dos materiais de pavimentação é baseada na premissa de uso de agregados naturais, o que deve mudar de forma efetiva, à medida que aumentar o emprego de materiais reciclados e alternativos, por escassez de agregados minerais ou por restrições ambientais.

3.2.1 Agregado de argila calcinada

Em vasta parte do território brasileiro, especialmente na Região Norte e parte do Centro-Oeste, não há pedreiras disponíveis e as distâncias de transporte tornam-se proibitivas sob o ponto de vista econômico. Nessas regiões, por outro lado, há grande disponibilidade de depósitos de argila que podem ser utilizadas para produzir agregados artificiais de dois tipos: de argila expandida e de argila calcinada.

O agregado de argila expandida teve sua aplicação em pavimentação no Brasil na década de 1980, mas pelas características necessárias para se obter a matéria-prima e produzir o agregado que se torna leve, seu uso foi incipiente. Passou-se logo, em 1997, por iniciativa do Instituto Militar de Engenharia (IME), a se pesquisar e produzir o que se chamou de agregado de argila calcinada, com vários trechos de aplicação.

Algumas bibliografias apresentadas em Cabral (2011), por exemplo, trazem informações a respeito do agregado de argila expandida, tais como a sua origem, a matéria-prima necessária, a forma de obtenção do agregado e as aplicações realizadas em pavimentação.

A experiência pioneira, no Brasil, para prover uma solução com o agregado de argila expandida para a pavimentação na região amazônica (DNER, 1981; Fabrício, 1986) foi efetuada no final da década de 1970 e início da década de 1980, sob a coordenação do IPR/DNER, mostrando a coleta de amostras de solos argilosos de diversos estados daquela região, estudos econômicos sobre a demanda de agregados, a construção e acompanhamento de trecho experimental e a construção de uma usina móvel para a fabricação dos agregados de argila expandida.

O uso de tijolos e telhas produzidos em olarias e cerâmicas convencionais, de forma empírica em algumas cidades da Região Norte, levaram a pesquisa a derivar para o estudo de argilas queimadas a temperaturas muito mais baixas do que as necessárias para a produção de argila expandida, e amplia o leque das matérias-primas adequadas no caso.

A produção de blocos cerâmicos destinados diretamente à britagem para uso em pavimentação, faz com que os agregados gerados se tornem mais adequados quanto à forma, à porosidade e à resistência mecânica. Assim, o formato dos blocos, as matérias-primas e temperaturas de queima mais adequadas geram agregados melhor adaptados para o uso em misturas asfálticas.

Na figura 3.12 mostra-se um exemplo de agregados de argila calcinada produzido em Santarém e utilizados na região na base e em TSD de segmento da BR 163, e, também em trecho no Rio de Janeiro (Cabral, 2011). Esse trecho, construído na Cidade Universitária da UFRJ, está em perfeito estado até o presente momento (2020). São materiais muito porosos que devem requerer maior teor de ligante ou uso de ligante mais viscoso.

Figura 3.12 – Agregados de argila calcinada e corpos de prova do trecho experimental no campus Fundão da UFRJ (RJ)



Fonte: Acervo dos autores.

3.2.2 Agregados reciclados

São muito estudados e até já utilizados eventualmente em pavimentação, os agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD). No entanto, para revestimentos asfálticos, esses materiais, nas granulometrias graúda e miúda, devem ser usados somente em casos muito especiais por que, em geral, são muito heterogêneos e porosos, consumindo muito ligante asfáltico. Preferencialmente devem ser usados em bases e sub-bases, e nessas camadas, são, em geral, muito adequados.

Neste item serão estudados especificamente agregados provenientes da fresagem de revestimentos asfálticos antigos (RAP), que podem e devem ser reaproveitados integralmente em uma nova camada asfáltica, seja levando para uma usina ou na reciclagem in situ. Eventualmente também usado em camada de base, misturado com os materiais existentes, nas reciclagens in situ, com ou sem adição de cimento ou outro estabilizante. Todos os dias, centenas de metros cúbicos de material fresado são gerados em todo o Brasil e é preciso dar um destino a este material que é nobre.

Na Europa o uso do RAP é regulamentado pela norma EN 13108-8 (2016) – Bituminous mixtures. Material specifications. Part 8: reclaimed asphalt. Na Alemanha e na Holanda a reciclagem está incorporada ao dia a dia das obras há mais de 30 anos. Países que têm mais dificuldade de obtenção de agregados britados novos, privilegiam o uso do material asfáltico fresado como componente de novas misturas asfálticas recicladas a quente em usinas. Na França, em 2009, segundo Yves Brosseaud (2011), houve uma decisão ministerial para sistematizar a adição de pelo menos 10% de fresados nas novas misturas; prever a fresagem das camadas asfálticas antigas e elevar a reciclagem a 20%; integrar a importância da taxa de reciclagem, como um critério de pontuação, nas concorrências e valorizar as soluções que contemplassem a fresagem com reciclagem. A mudança das especificações europeias para os agregados e misturas asfálticas contemplando os agregados reciclados (RAP), e a criação de protocolos de qualidade minimizaram as preocupações e permitem que os agregados reciclados concorram em "pé de igualdade" com os agregados novos (Shell, 2015).

Ainda não é tão intenso como deveria ser o uso de material fresado em novas misturas asfálticas no Brasil. Nos Estados Unidos, 100 milhões de toneladas de material fresado são utilizadas por ano em novas misturas asfálticas e na Europa, 50 milhões de toneladas por ano são recicladas. No Brasil, segundo Tuckumantel (2019), de 1986 até 2019, somente 0,7 milhão de toneladas de fresado foram reciclados a quente e 2 milhões de toneladas recicladas a frio. A maioria do material fresado, aqui no Brasil, tem sido utilizado em revestimentos de estradas rurais, sem nenhum tratamento especial ou de rejuvenescimento, o que pode ser considerado um bom uso também (figura 3.13).

Também eventualmente são utilizados os fresados para compor uma nova base, reciclando o revestimento e parte da base preexistente, como mostrado na figura 3.14, numa proporção de menos de 10% das obras de restauração de rodovias federais.

O material fresado tem sido estudado para composição de misturas asfálticas a quente ou a frio e utilizado como revestimentos novos, atualmente de forma especial pelas concessionárias. Na figura 3.15 mostram-se exemplos de fresadoras e de agregados oriundos de fresagem, usados em misturas asfálticas usinadas. As misturas asfálticas com fresado podem ser recicladas a frio ou a quente, in situ ou em usina, aplicando-se todos os controles tecnológicos habituais de uma mistura.

Figura 3.13 – Exemplo de utilização de material fresado em estradas rurais



Fonte: Acervo dos autores.

A reciclagem com uso de agregado fresado para compor uma nova mistura asfáltica deve levar em conta que esse material já contém certa quantidade de ligante asfáltico, e mesmo que este esteja envelhecido, pode ser descontado em parte do novo teor de ligante, sempre que a proporção de RAP for maior do que 15% em relação ao agregado novo, conforme norma AASHTO M 323. Existem também agentes rejuvenescedores, especificados pela ANP, que podem ser utilizados para melhorar as características do ligante envelhecido que recobre os agregados.

Muitas pesquisas sobre o uso de agregado fresado em novas misturas asfálticas têm sido feitas, e trechos construídos são acompanhados por alguns anos de forma a se aperfeiçoar esta técnica. Algumas referências brasileiras para consulta mais detalhada são: Castro Neto (2000); Castro (2003); Fritzen et al. (2012); Zubaran (2015); Guatimosim (2015); Bessa et al. (2016); Kuchiishi et al. (2019), Suzuki (2019); Gaspar (2019); Raul (2019), entre outros.

Figura 3.14 – Uso de fresado como parte de reciclagem de base em estradas federais

RECICLAGEM – BR-153/PR



RECICLAGEM – BR-153/TO



Fonte: Disponível em: <www.dnit.gov.br>.

A utilização de RAP em misturas asfálticas requer uma gestão eficiente do fresado desde sua fresagem, disposição em pilhas, peneiramento e dosagem da mistura. Informações sobre coleta de amostras, testes de caracterização do fresado para projeto de mistura e práticas de controle durante a fresagem, separação em pilhas por peneiramento, britadores com o propósito de separar aglomerados e não reduzir granulometria de agregados estão na publicação Best practices for RAP and RAS management – NAPA, quality improvements series 129 (NAPA, 2015).

Figura 3.15 – Operação de fresagem e reciclagem de revestimentos asfálticos e exemplos de pilhas de material fresado



Fonte: Acervo dos autores.

3.2.3 Agregado siderúrgico

As escórias siderúrgicas são produtos resultantes de processos industriais destinados a obter, em primeiro lugar, o ferro-gusa líquido e, em segundo, o aço. A escória de aciaria é gerada no processo de fabricação do aço, resultante da transformação do ferro-gusa líquido em aço. Existem vários processos de fabricação do aço e, portanto, variam os tipos de resíduos resultantes dos processos. Quando devidamente preparados para uso em pavimentação, recebem o nome de agregado siderúrgico.

Existem dois tipos de escórias siderúrgicas produzidos em larga escala: alto-forno e aciaria. A escória de alto-forno tem outros usos que não só a pavimentação. A escória de aciaria é a mais utilizada, com muitos estudos já feitos e vários trechos construídos. Tem aplicação em campo em base e sub-base, e em revestimentos asfálticos do tipo tratamento superficial, pré misturada a frio e concreto asfáltico. As escórias de aciaria podem ser aplicadas até em camada de rolamento de rodovia de trânsito pesado devido às suas características de elevada resistência ao desgaste e ao polimento. Já foi estudada em laboratório para uso em mistura tipo SMA.

No entanto, um dos maiores entraves quanto à utilização da escória de aciaria na construção rodoviária é o seu potencial expansivo. A escória para uso em pavimentação deve ter tratamento prévio para redução da expansão. Nas parcelas mais finas é que em geral se concentra o potencial expansivo. A exposição às intempéries e a molhagem periódica das pilhas de estocagem são os procedimentos usuais de diminuição do potencial expansivo das escórias. Na figura 3.16 mostram-se exemplos de agregados siderúrgicos que foram usados em misturas asfálticas. Muitas vezes os agregados siderúrgicos podem ser porosos o que faz aumentar o teor de ligante a ser utilizado. Às vezes são vítreos, o que pode prejudicar a adesividade. Muitas referências listadas tratam do uso de escórias em misturas asfálticas.

O DNIT tem normas de utilização de escória de aciaria ou agregado siderúrgico, como base e sub-base, com os critérios a serem atendidos (DNIT ES 406 e 407).

Na análise ambiental em geral as escórias de aciaria são classificadas como Classe II – A, não perigoso e não inerte, nos ensaios de lixiviação da NBR 10.004/2004, mas em pesquisa realizada pelo IPR não se detectaram elementos de poluição das águas fluviais por impacto das chuvas.

Outro resíduo também estudado para emprego em misturas asfálticas é o resíduo de areia de fundição. Bonet (2002) avaliou areias de fundição do sul e concluiu que é viável, técnica e ambientalmente, a incorporação dos resíduos de areia de fundição no concreto asfáltico, até como uma forma de proteção ao meio ambiente. Coutinho Neto (2004) e Coutinho Neto e Fabbri (2004) mostram uma avaliação mecânica e ambiental da utilização da areia de fundição em misturas asfálticas, concluindo que apresentam boas propriedades sendo viável seu emprego em concreto asfáltico. Wesseling (2005) avaliou em laboratório misturas asfálticas com escória de aciaria e areia de fundição. Costa (2008), Carnin (2008) e Salla e Luvizão (2019) também avaliaram positivamente o uso de areia de fundição.

Figura 3.16 – Exemplos de obras de revestimentos asfálticos com agregados siderúrgicos e estudo de laboratório para SMA

Utilização de agregados siderúrgicos		
		
		
Tratamento superficial (Rocha, 2011)		
 Dois tipos de forno	 Ensaio de expansão	 Corpo de prova
SMA (Tavares, 2012)		
		
Uso em PMF (Loures, 2017)		

Fontes: Rocha, 2011; Loures, 2017; Tavares, 2012.

4. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS AGREGADOS

As propriedades dos agregados que dependem da sua origem são em geral as associadas à resistência dos grãos, à sanidade e à presença de materiais deletérios, sendo que os ensaios e os valores admissíveis dessas características variam dependendo do uso do agregado e da agência ou órgão regulador.

Por outro lado, as características morfológicas dos agregados (forma, circularidade, textura superficial e angularidade) são fundamentais para seu comportamento numa mistura asfáltica, e dependem de como são obtidas as partículas naturais, artificiais ou recicladas. É consenso que exercem enorme influência no desempenho em campo. A forma das partículas graúdas dos agregados, por exemplo, é uma propriedade muito importante e tem grande influência no desempenho da mistura asfáltica, e partículas com formato mais cúbico, proporcionam melhor intertravamento e empacotamento mais denso.

4.1 Forma, textura e angularidade

As partículas de agregados têm formas irregulares em geral, mas que podem ser avaliadas, por aproximação, como esferoidais ou lamelares. Na figura 4.1 apresenta-se um esquema de definição dos vários aspectos dos grãos que se agrupam no conceito da morfologia, que inclui a forma, a textura e a angularidade.

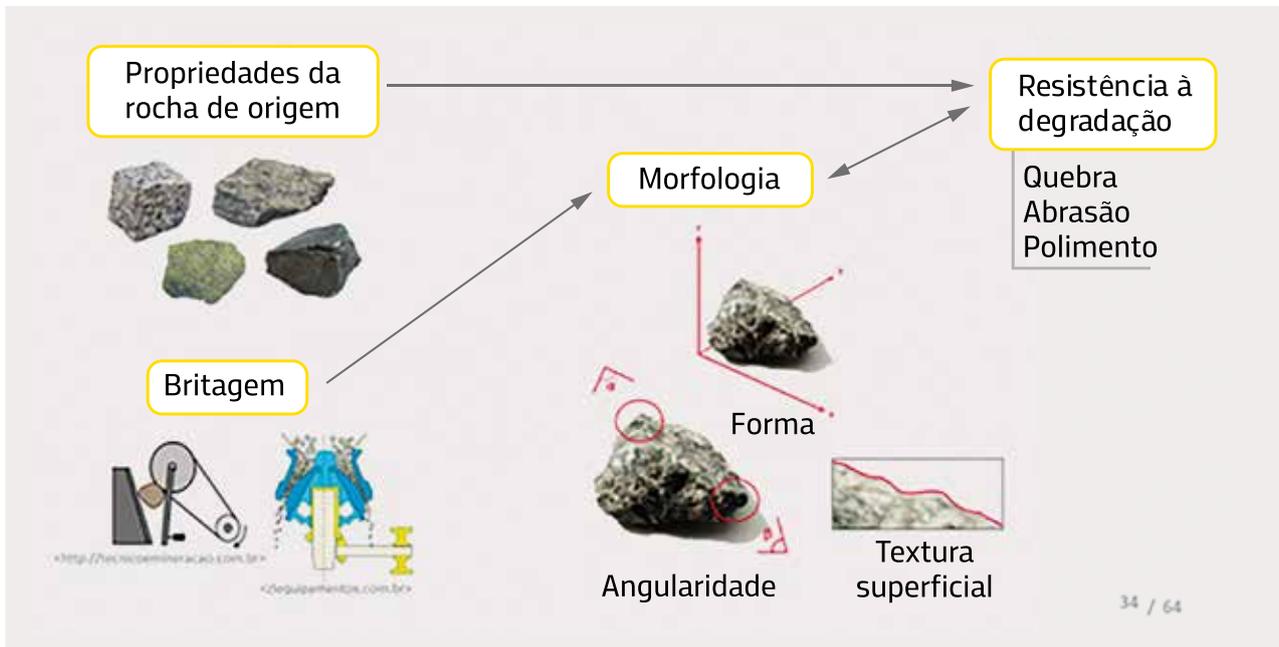
As partículas esferoidais apresentam dimensões aproximadas em todas as direções e poderão ser ainda avaliadas quanto à angularidade (angulosas – cúbicas, ou esféricas) e quanto à textura superficial (lisas ou rugosas).

Todas essas características têm algum impacto no desempenho do conjunto dos agregados: a forma, a angularidade e a textura superficial de partículas de agregados têm influência no comportamento desses materiais quando utilizados em misturas asfálticas, concreto de cimento Portland e camadas granulares.

Bessa (2012) avaliou três agregados da região de Fortaleza, um granito, um gnaisse e um fonólito, e fez a análise da forma e qualidade dos agregados. Os agregados apresentaram diferentes características mecânicas nas várias frações analisadas. Preparou misturas asfálticas e realizou ensaios mecânicos. Os três materiais foram classificados como semialongados, pouco esféricos e subarredondados. Porém variaram na textura superficial que foi considerada pouco, média e muito rugosa. Concluiu que, tendo as propriedades de forma e angularidade muito próximas, o processo de britagem, que era parecido nas três pedreiras, foi mais importante do que as propriedades das rochas, e as propriedades mecânicas das misturas asfálticas avaliadas ficaram próximas.

A angularidade do agregado graúdo influencia atrito interno na matriz pétreia da mistura, ou seja, propicia uma maior resistência ao cisalhamento; a angularidade do agregado miúdo se relaciona com a resistência ao escorregamento e assegura o atrito interno nessa porção dos agregados; e a presença acentuada de partículas chatas e alongadas são indesejáveis visto que tendem à quebra durante a fase construtiva e sob ação do tráfego, deixando faces expostas sem ligante. A maior angularidade propicia mais pontos de contato entre grãos, intertravamento e uniformidade da distribuição de forças internas.

Figura 4.1 – Definições e influências entre as características dos agregados



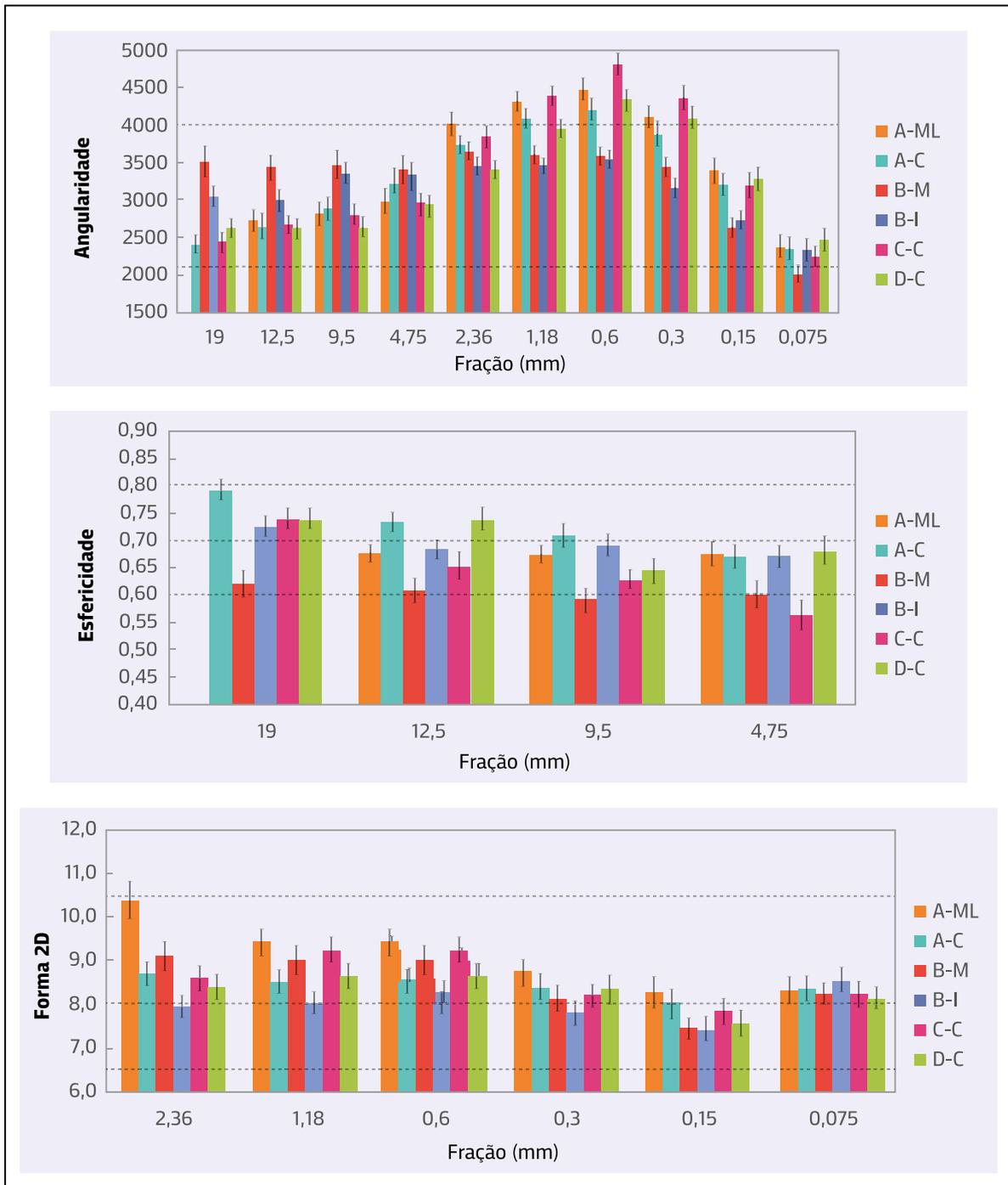
Fonte: Diógenes, 2015.

Diógenes (2015) concluiu que agregados aparentemente semelhantes (granitos, gnaisses) apresentaram diferenças na textura superficial, na resistência à quebra, ao polimento e à abrasão. A mineralogia das rochas analisadas teve pouca ou nenhuma influência na forma e na angularidade de agregados graúdos, se comparada à grande influência da forma de britagem. A mineralogia tem maior influência na textura superficial dos agregados graúdos, na forma e angularidade de miúdos. Os tipos de britadores e a abertura do britador cônico tiveram influência na forma e na angularidade dos agregados. O teor de biotita na rocha aumenta a resistência ao choque; diminui a da perda de massa e de angularidade e aumenta a da perda de rugosidade. O fonólito tem resistência ao choque, à perda de massa e de angularidade, e menor à perda de rugosidade.

Na figura 4.2 mostra-se, como exemplo, o efeito na angularidade, esfericidade e forma 2D, de agregados de diferentes origens, gerados por diferentes britadores (cônico, mandíbula, impacto), onde a legenda das colunas se refere à seguinte combinação de características (Diógenes, 2015):

- A-C: pedreira A, britador cônico;
- A-ML: pedreira A, britador mandíbula-laboratório;
- B-I: pedreira B, britador impacto;
- B-M: pedreira B, britador mandíbula;
- C-C: pedreira C, britador cônico;
- D-C: pedreira D, britador cônico.

Figura 4.2 – Efeito da origem da rocha e dos processos de britagem na angularidade, esfericidade e dos agregados nos vários tamanhos de partículas



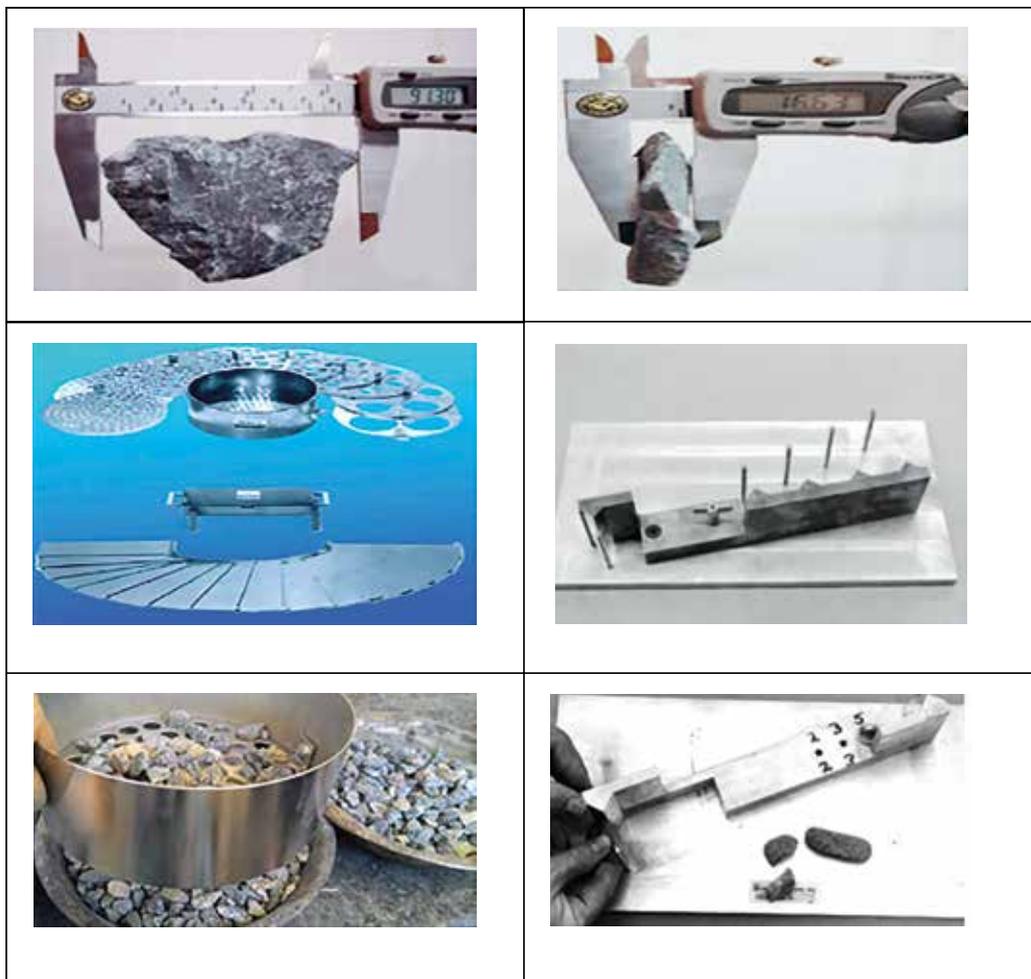
Fonte: Diógenes, 2015.

A forma ou lameridade trata da determinação do percentual de partículas chatas e alongadas em agregados graúdos, comparando a dimensão máxima de uma partícula com a sua dimensão mínima. A relação entre as dimensões de uma amostra de agregado graúdo é comparada com especificações que a limitam. Define-se como partícula alongada a que tem uma razão de comprimento para largura maior que determinado valor. E com partículas chatas e alongadas de agrega-

do gráudo as que têm uma razão de comprimento para espessura maior que determinado valor. Essas medidas podem ser feitas com paquímetro ou com um calibre especialmente preparado com razões de dimensões predefinidas. O índice de forma feito com o paquímetro é expresso pela média das relações ponderadas entre comprimento e espessura, ponderada pelas proporções de partículas ensaiadas em cada fração ou peneira.

O índice de forma mais tradicional é definido em um intervalo de 0,0 a 1,0, sendo considerado de ótima cubicidade quando é 1,0 e lamelar quanto é 0,0. Muitas especificações admitem o valor $F = 0,5$ como limite de aceitação quanto à forma dos agregados. Na figura 4.3 mostram-se essas técnicas de medição das dimensões das partículas, que, quando se fazem a relação entre as dimensões, geram o índice de forma ou outras relações das dimensões maior e menor de cada grão.

Figura 4.3 – Procedimentos tradicionais para a avaliação da forma dos agregados



Fonte: Acervo dos autores.

Na tabela 4.1 mostra-se um critério norte-americano para aceitação de agregados gráudos que limita em 10%, no máximo, o total de partículas chatas e alongadas para qualquer nível de tráfego.

Tabela 4.1 – Requisitos Superpave de percentual de partículas chatas e alongadas

Tráfego Nx10 ⁶ (AASTHO)	% máximo de partículas chatas e alongadas
< 0,3	–
< 1	–
< 3	10
< 10	10
< 30	10
< 100	10
≥ 100	10

Fonte: Elaborada pelos autores.

Na Europa também existe um limite máximo para partículas achatadas que se denomina índice de achatamento (FI), conforme a EN 933-3 e índice de forma, de acordo com a EN 933-4. Os limites são apresentados na norma EN 18545, Agregados – elementos de definição, conformidade e codificação, dependem do tipo de mistura, onde FI deve apresentar valores de 15, 25 ou 35% no máximo.

Outro aspecto importante a ser avaliado é a textura superficial dos agregados, que se combina com a avaliação de número de faces fraturadas e arestas vivas. São definidos critérios para definir a porcentagem de agregados graúdos com faces rugosas e arestas angulosas, provenientes de quebra natural ou de processo de britagem, denominado percentual de partículas fraturadas. Requisitos relacionados ao percentual de partículas fraturadas presentes nos agregados graúdos ajudam a maximizar a resistência ao cisalhamento pelo aumento do atrito entre os agregados. Para o agregado graúdo se define a porcentagem de faces fraturadas, que dá uma avaliação da angularidade dos grãos e, de maneira visual, a textura da superfície, entre lisa e rugosa.

Na tabela 4.2 mostra-se um critério norte-americano para aceitação de agregados graúdos quanto ao número de faces fraturadas de acordo com o volume de tráfego, para camadas asfálticas a diferentes profundidades em relação à superfície do revestimento. Na Europa também existe um limite para o percentual de faces fraturadas, determinado conforme a EN 933-5. Os limites são apresentados na norma EN 13043, Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação, não dependem do nível de tráfego, devendo se situar entre 90 a 100% de partículas fraturadas.

O ensaio do pêndulo britânico é um procedimento comum para se medir a microtextura superficial de um revestimento asfáltico e esta condição, no campo, está relacionada à própria macro e microtextura da superfície do agregado mineral, que pode ser áspera ou polida. Para satisfazer a medida do pêndulo, os agregados devem ser angulosos e ásperos.

O ensaio denominado de angularidade do agregado fino permite uma avaliação indireta da forma e textura das areias. Consiste em medir a quantidade de agregado fino que preenche um volume estabelecido, quando cai de uma certa altura. Quanto maior o volume, mais anguloso o material. Na figura 4.4 mostram-se alguns passos do ensaio. Esse teor de vazios é uma indicação indireta

ta da angularidade, esfericidade e textura da superfície deste agregado comparado com outros agregados miúdos (DNIT 415/2019-ME). Para esse ensaio, na mesma figura, mostra-se o critério norte-americano para aceitação da medida, em função do volume de tráfego.

Na Europa também existe um limite para a angularidade do agregado fino, denominado angularidade de finos (ECS), determinado conforme a EN 933-6. Os limites são apresentados na norma EN 18545, Agregados – elementos de definição, conformidade e codificação, dependem do tipo de mistura, onde ECS deve apresentar valores de 30 e 35% no máximo.

Tabela 4.2 – Requisitos Superpave de percentual de faces fraturadas para os agregados graúdos (a) e porcentagem de partículas chatas e alongadas (b)

Tráfego Nx10 ⁶ (AASHTO)	% máximo de partículas chatas e alongadas	Profundidade da camada em relação à superfície
	< 100mm	> 100mm
< 0,3	55/--	--/--
< 1	65/--	--/--
< 3	75/--	50/--
< 10	85/80	60/--
< 30	95/90	80/75
< 100	100/100	95/90
≥ 100	100/100	100/100

Obs.: 85/80 significa que 85% do agregado graúdo têm uma ou mais faces fraturadas e 80% têm duas ou mais faces fraturadas.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 4.4 – Detalhe do ensaio de angularidade de agregados finos e valores admissíveis



Tráfego Nx10 ⁶ (AASHTO)	Profundidade da camada em relação à superfície	
	< 100mm	> 100mm
< 0,3	–	–
< 1	40	–
< 3	40	40
< 10	45	40
< 30	45	40
< 100	45	45
≥100	45	45

Fonte: Elaborada pelos autores.

Em 2006, foi introduzido no país um equipamento que permite fazer de forma automática todas essas avaliações simultaneamente, a partir de imagens. Os procedimentos para a realização desse ensaio para a caracterização das propriedades de forma, textura e angularidade de agregados, grãos e miúdos, por meio do processamento digital de imagens (PDI) estão normatizados pelo DNIT, norma de ensaio (DNIT 432/2020-ME).

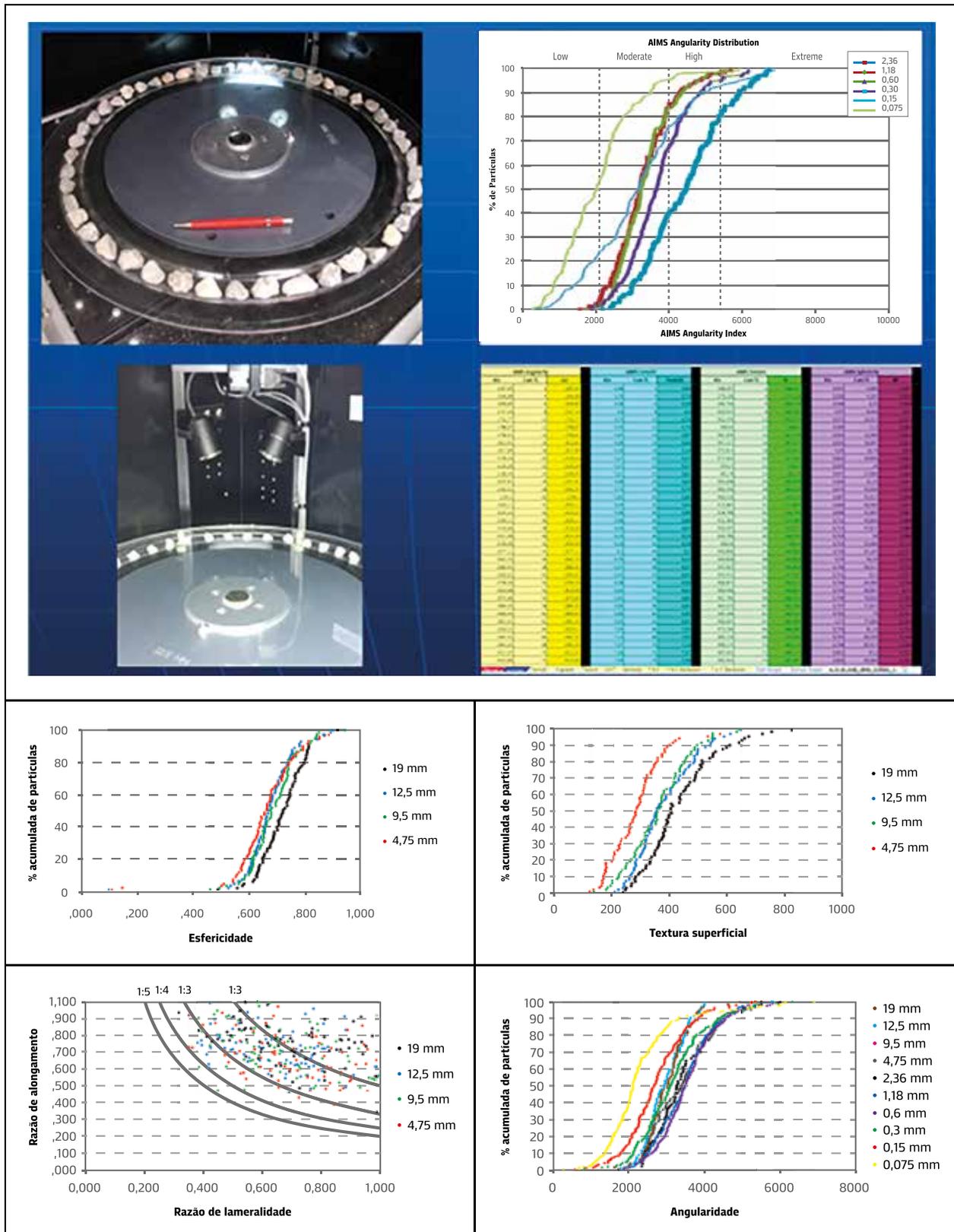
Shell (2015) indica que técnicas de análise de imagem caracterizam com mais precisão a forma, angularidade e textura dos agregados. Várias técnicas de aquisição, processamento e análise de imagens dos agregados como microscopia óptica, imagem digital e varredura a laser determinam com detalhes as características das partículas que se correlacionam com as propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Também são empregadas para medir a textura das superfícies asfálticas e correlacioná-las com a resistência ao atrito.

A figura 4.5 mostra o equipamento e exemplos das medições que são feitas. O equipamento, conhecido como AIMS, tem diversas bandejas, correspondentes aos vários tamanhos de grãos, o que permite uma análise detalhada dos vários aspectos dos agregados, e no Anexo 3 há mais um exemplo. Castelo Branco et al. (2006) apresentam as bases desse equipamento, que tem sido muito citado nos últimos anos em teses e dissertações. Essa técnica rápida e objetiva de analisar as características de forma, textura, angularidade e esfericidade tem permitido avaliar os efeitos dessas características no comportamento mecânico das misturas asfálticas, como mostrado, por exemplo, em Boeira (2014), Pazos (2015), Aragão et al. (2016), Ibiapina et al. (2018), Maia e Castelo Branco (2019), Ibiapina et al. (2020). Avaliação do efeito dos ensaios mecânicos nas características de agregados de diferentes geologias foram feitas, com esta técnica, por Alves (2014) e Trotta (2020), entre outros.

A forma, faces fraturadas e a textura superficial podem ser percebidas visualmente nas partículas maiores, e a figura 4.6 mostra exemplos de agregados naturais com diferentes características. Mas fazer essas observações visualmente e ainda proporcionalmente na amostra torna-se cansativo e sujeito a falhas humanas. Assim, um equipamento que faz isso e muito mais automaticamente traz uma avaliação mais abrangente e não dependente do operador, podendo ser usado para agregados grãos e miúdos.

Na tabela 4.3 estão indicados os limites propostos para as diferentes avaliações feitas com o AIMS, que expressam as características dos agregados brasileiros. Esses valores foram extensamente analisados na tese de doutorado de Ibiapina (2018), que avaliou um banco de dados de pedreiras de várias geologias e agregados naturais de locais distintos, além de um estudo de repetibilidade e reprodutibilidade. Também analisou a influência da mudança de forma dos agregados na formação do esqueleto mineral de um concreto asfáltico. Concluiu que as mudanças das propriedades de forma, provocadas com o equipamento Micro Deval, na formação do esqueleto mineral das misturas asfálticas não devem ser avaliadas isoladamente. O intertravamento de agregados é impactado também pelas mudanças na granulometria e nos parâmetros de dosagem das misturas asfálticas.

Figura 4.5 – Equipamento de processamento digital de imagem (PDI-AIMS) e exemplo de tipos de resultados fornecidos



Fonte: Acervo dos autores.

Figura 4.6 – Exemplos de agregados naturais com diferentes características de textura superficial e faces fraturadas



Fonte: Acervo dos autores.

Tabela 4.3 – Critérios de qualificação da forma, textura e angularidade dos agregados obtidos pelo PDI proposta para os agregados brasileiros

Propriedade	Valores limite				
	Forma 2D	< 4,0	4,0-11,0	11,0-15,5	> 15,5
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	-
Angularidade	< 1.260	1.260-4.080	4.080-7.180	> 7.180	-
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	-
Esfericidade	< 0,5	0,5-0,7	0,7-0,9	> 0,9	-
	Achatado/ alongado	Baixa esfericidade	Esfericidade moderada	Alta esfericidade	-
Textura	< 260	260-440	440-600	600-825	> 825
	Polido	Macio	Baixa rugosidade	Rugosidade moderada	Alta rugosidade

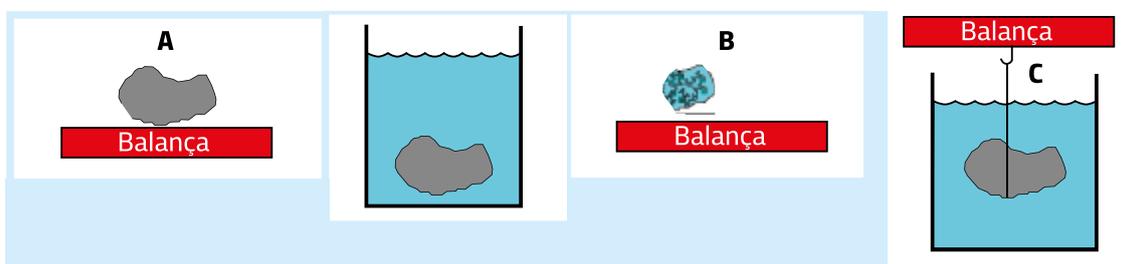
Fonte: Ibiapina, 2018.

4.2 Densidades e absorção

Para bem avaliar as características físicas dos agregados é necessário determinar sua massa específica, a massa específica relativa (densidade) e a absorção dos agregados graúdos e miúdos.

As normas DNIT-ME 413/2019 e 411/2019 definem os procedimentos para obter a massa específica média de partículas de agregados graúdo ou miúdo (não incluindo o volume de vazios entre as partículas), a massa específica relativa (densidade) e a absorção do agregado graúdo ou miúdo, com base na massa de agregados saturados com superfície seca (figuras 4.7 e 4.8).

Figura 4.7 – Esquema das medidas de massa para determinação de massa específica e densidade do agregado graúdo



Fonte: Acervo dos autores.

Figura 4.8 – Determinação de densidade e absorção dos agregados miúdos



Fonte: Acervo dos autores.

Dependendo do procedimento utilizado, a massa específica, em kg/m^3 , é expressa como seca (b), superfície saturada seca (sss), ou massa específica real (a). A densidade, grandeza adimensional, é expressa como seca (b), superfície saturada seca (sss), ou como densidade real (a). A massa específica (μ_b) e a densidade (G_b) são determinadas após a secagem do agregado. A massa específica (μ_{sss}), a densidade (G_{sss}) e a absorção são determinadas após a imersão dos agregados em água

por tempo preestabelecido e medida da massa após secagem superficial dos grãos. São utilizadas para calcular o volume ocupado pelos agregados nas misturas asfálticas e o volume de vazios dos agregados.

A absorção refere-se ao aumento na massa de agregado devido à entrada de água nos poros das partículas durante certo tempo preestabelecido de imersão, sem incluir a água aderida à superfície externa das partículas, expresso como uma porcentagem da massa seca. Não se deve utilizar agregados de alta absorção por duas razões principais: caso os agregados não sejam estocados em locais cobertos, nas usinas, podem reter água no seus poros que não consegue ser eliminada no tambor misturador e, se muito porosos, têm consumo maior de ligante asfáltico, ficando antieconômico.

Nas especificações atuais de dosagem de concreto asfáltico recomenda-se o chamado envelhecimento de curto prazo, que consiste em deixar a massa asfáltica solta por 2 horas na estufa na temperatura de compactação. Entre outros aspectos, este procedimento permite a absorção do ligante pelos eventuais poros dos agregados. Gouveia (2004) avaliou três tipos de agregado e concluiu que o agregado absorve asfalto durante as 2 horas de permanência da mistura na temperatura de compactação, não absorvendo mais asfalto a longo prazo.

Definem as normas DNIT as seguintes características:

- a) massa específica: massa (peso ao ar) por volume unitário de um material, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3), ou outra unidade do SI;
- b) massa específica aparente dos grãos do agregado (μ_{sb}): razão entre a massa de agregado seco em estufa por volume unitário de partículas de agregado, incluindo o volume de poros permeáveis e impermeáveis dentro das partículas, mas não incluindo os vazios entre as partículas;
- c) massa específica do agregado saturado com superfície seca (μ_{sss}): massa do agregado, na condição saturada e superfície seca, por volume unitário das partículas de agregado, incluindo o volume de poros permeáveis e impermeáveis e preenchidos com água dentro das partículas, não incluindo os vazios entre as partículas;
- d) massa específica real de agregado seco (μ_{sa}): massa por volume unitário da porção impermeável das partículas de agregados;
- e) massa específica relativa (densidade): razão entre a massa específica de um material e a massa específica de água destilada, em certa temperatura, em geral 23°C , denominada de densidade, adimensional;
- f) densidade aparente do grão do agregado (G_{sb}): razão entre a massa específica aparente do grão do agregado e a massa específica de água destilada em uma dada temperatura, em geral 23°C ;

- g) densidade do agregado saturado com superfície seca (G_{ss}): razão entre a massa específica do agregado saturado com superfície seca e a massa específica de água destilada em uma dada temperatura, em geral 23°C;
- h) densidade real (G_{sa}): razão entre a massa específica real do agregado e a massa específica de água destilada em uma dada temperatura, em geral 23°C.

4.2.1 Densidade relativa máxima medida e massa específica máxima medida em amostras não compactadas

A densidade máxima medida (G_{mm}) substitui a densidade máxima teórica (DMT) calculada pela média ponderada das densidades dos componentes da mistura asfáltica, sendo igual ou menor do que DMT, dependendo da absorção dos agregados. É a razão entre a (massa do agregado mais ligante asfáltico) e a (soma dos volumes dos agregados, vazios impermeáveis, vazios permeáveis não preenchidos com asfalto e volume total de asfalto), medidos em laboratório com os procedimentos normalizados.

A densidade relativa máxima medida é a razão entre a massa da mistura asfáltica não compactada (solta) e a massa de água por ela ocupada, ambas à temperatura do ensaio, medidas em laboratório. A massa específica máxima medida é a razão entre a massa da mistura asfáltica não compactada (solta) e seu volume à temperatura do ensaio, medidas em laboratório. São usadas no projeto de dosagem e no controle das misturas asfálticas em usina, em laboratório ou extraídas de campo. É conhecido como método Rice e suas características estão simplificada e indicadas na figura 4.9.

Figura 4.9 – Passos do ensaio de densidade máxima medida da mistura asfáltica não compactada



Fonte: Acervo dos autores.

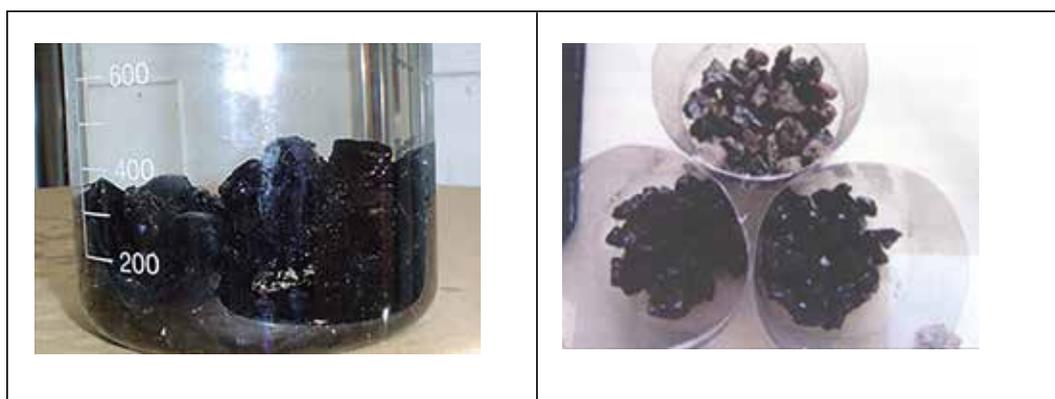
4.3 Adesividade

A adesividade agregado-ligante asfáltico é a propriedade do agregado de ser aderido pelo material asfáltico. Os ensaios para determinação de adesividade podem ser subdivididos em dois grupos: os que analisam o comportamento de partículas de agregados recobertas por ligante asfáltico, considerando a adesão ativa agregado-ligante e aqueles que analisam o desempenho adesivo e coesivo de determinadas propriedades mecânicas de misturas sob a ação da água (Ceratti e Reis, 2011). A adesividade mede a capacidade de uma mistura de se manter coesa durante toda sua vida de serviço.

O efeito da água, com solução de carbonato de sódio, em separar ou descolar a película de ligante asfáltico da superfície do agregado pode torná-lo inaceitável para o uso em misturas asfálticas. Nos ensaios tradicionais observa-se o eventual descolamento da película de ligante da superfície do agregado quando submetido ao aquecimento em água fervente com produto químico específico. É um ensaio severo, feito com a mistura solta, e de análise visual subjetiva. Nas figuras 4.10 e 4.11 mostram-se resultados de adesividade tradicional.

De forma mais adequada, é utilizado atualmente o método de ensaio de dano por umidade induzida (DUI). Neste caso, o teste é feito com a mistura asfáltica compactada e submetida a procedimentos de condicionamento em temperatura negativa e após em água a 60°C. São dois conjuntos de três corpos de prova, um conjunto não sofre o condicionamento e o outro sim, ambos são ensaiados à compressão diametral estática e faz-se a relação entre as resistências à tração dos dois conjuntos. Compara-se esta relação a valores admissíveis e, caso não seja atingido, adicionam-se produtos melhoradores de adesividade normalizados na mistura asfáltica. Na figura 4.11 ilustram-se os passos deste ensaio que está normalizado pelo DNIT (ME 180/2018).

Figura 4.10 – Exemplo de ensaio de adesividade expedita do agregado com o asfalto (não aderido) e com dois teores de agente melhorador de adesividade (aderido)



Fonte: Acervo dos autores.

Figura 4.11 – Exemplos do resultado do ensaio de adesividade visual de agregados do RS



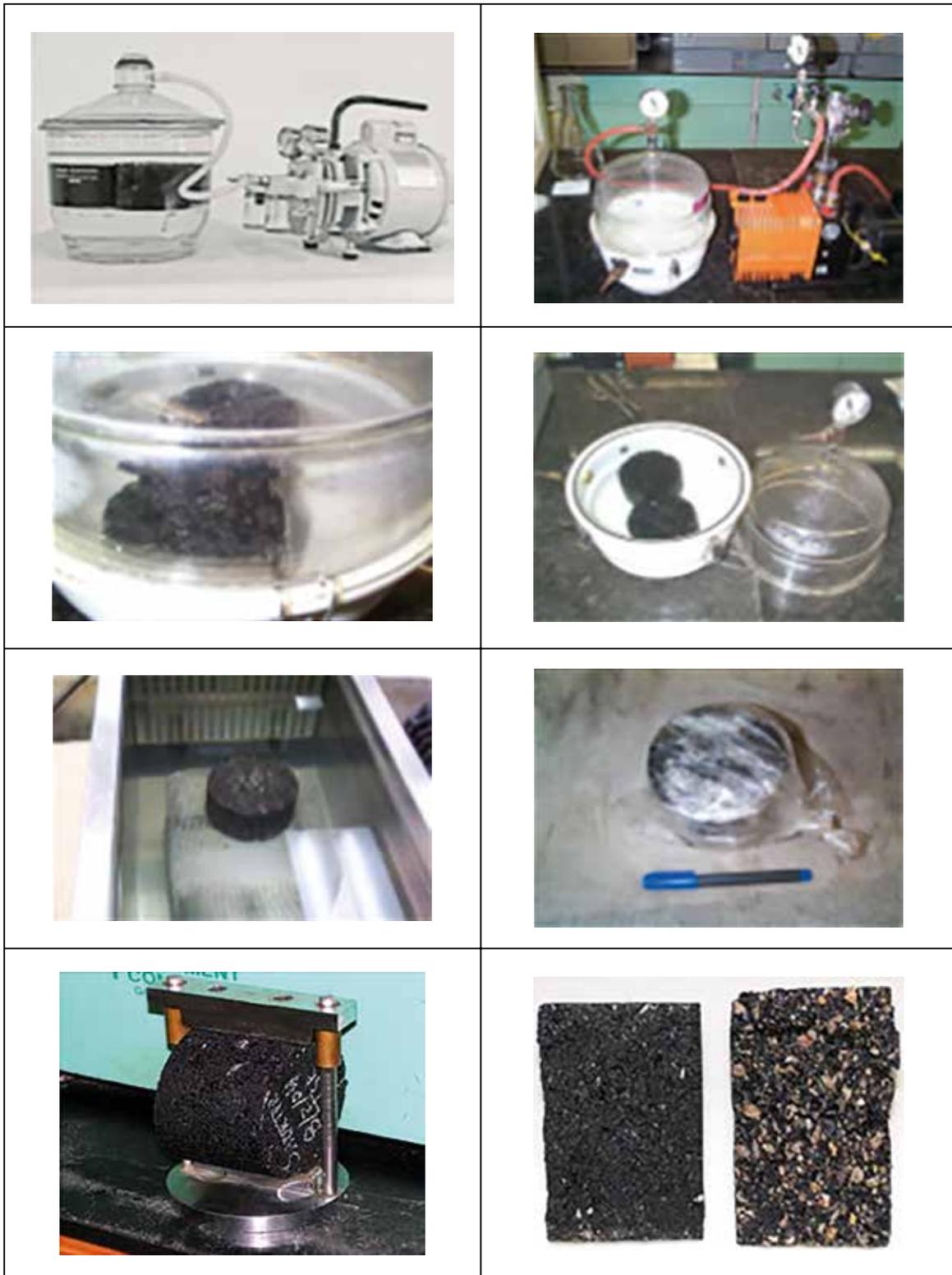
Fonte: Brondani, 2019.

A adesividade do agregado-ligante está intimamente ligada ao tipo de rocha e, sendo o CAP ácido, tem mais afinidade com as rochas básicas. O teor de sílica (SiO_2) das rochas é usado para classificar a "acidez" em rochas ácidas, intermediárias, básicas ou ultrabásicas, de acordo com as seguintes porcentagens: > 65% em massa – ácido; entre 52 e 65% – intermediário; 45 a 52% – básico e < 45% em ultrabásico. Deve-se considerar, porém, que os termos ácido e básico usados aqui são expressões geológicas e não indicam um nível de pH, necessariamente.

Rochas ígneas podem ser definidas por sua composição mineralógica e tamanho dos cristais. O riolito e o granito, por exemplo, têm a mesma composição (ácida), mas tamanhos de cristal muito diferentes, e, portanto, têm nomes diferentes, como também ocorre com o basalto e o gabro (básico). As principais rochas sedimentares para uso em misturas asfálticas são o calcário, o dolomito e o arenito que têm características básicas.

Na Europa, o ensaio de ebulição dos basaltos – Sonnenbrand, determinado de acordo com a EN 1367-3:2002, é considerado um ensaio de durabilidade face à meteorização. A alteração do tipo Sonnenbrand manifesta-se como consequência das condições atmosféricas e pode ou não ser observada nos basaltos. Caracteriza-se pelo aparecimento de manchas cinzentas/brancas em forma de estrela e é a partir destas que se formam fissuras radiais que se interligam. Este fenômeno reduz a resistência da rocha resultando na sua desagregação em pequenas partículas.

Figura 4.12 – Ensaio de dano por umidade induzida (DUI)



Fonte: Acervo dos autores.

4.4 Sanidade ou durabilidade

Apesar das rochas terem alta resistência inicial quando são usadas, muitas modificações de suas características podem surgir com o tempo. A intensidade das modificações depende do tipo de rocha, do grau de alteração inicial e dos fatores ambientais. Pode haver mudança granulométrica, diminuição de resistência, aumento da porosidade e diminuição da adesividade.

O ensaio visa determinar a resistência do agregado à desintegração química ou ao intemperismo. A característica de um agregado ser pouco ou muito afetado pelas condições climáticas e ação do tempo, é denominada de durabilidade, e, como em geral, é feita por ataque químico de certos produtos selecionados, também é referida como sanidade. Utilizam-se, em geral, soluções saturadas de sulfato de sódio ou de magnésio, elementos expansivos. A amostra é imersa na solução por 16 a 18 horas, em geladeira, a 21°C, em seguida é colocada em estufa a 105-110°C, até peso constante, o que compõe um ciclo do ensaio. Repete-se este ciclo, por várias vezes, e, verifica-se a perda de peso das várias frações do agregado ensaiado ao final dos ciclos (figuras 4.12 e 4.13).

Para o basalto, é possível realizar também um ensaio denominado de alterabilidade, utilizando a imersão de fragmentos no etilenoglicol por cerca de 15 dias, e, em seguida, analisa-se a eventual desagregação dos agregados por variação de massa.

Figura 4.13 – Exemplo da ocorrência de desagregação e fendilhamento do agregado no ensaio de durabilidade (sanidade), com cinco ciclos no sulfato de magnésio



Fonte: Acervo dos autores.

Figura 4.14 – Passos do ensaio de sanidade de agregados e produtos usados



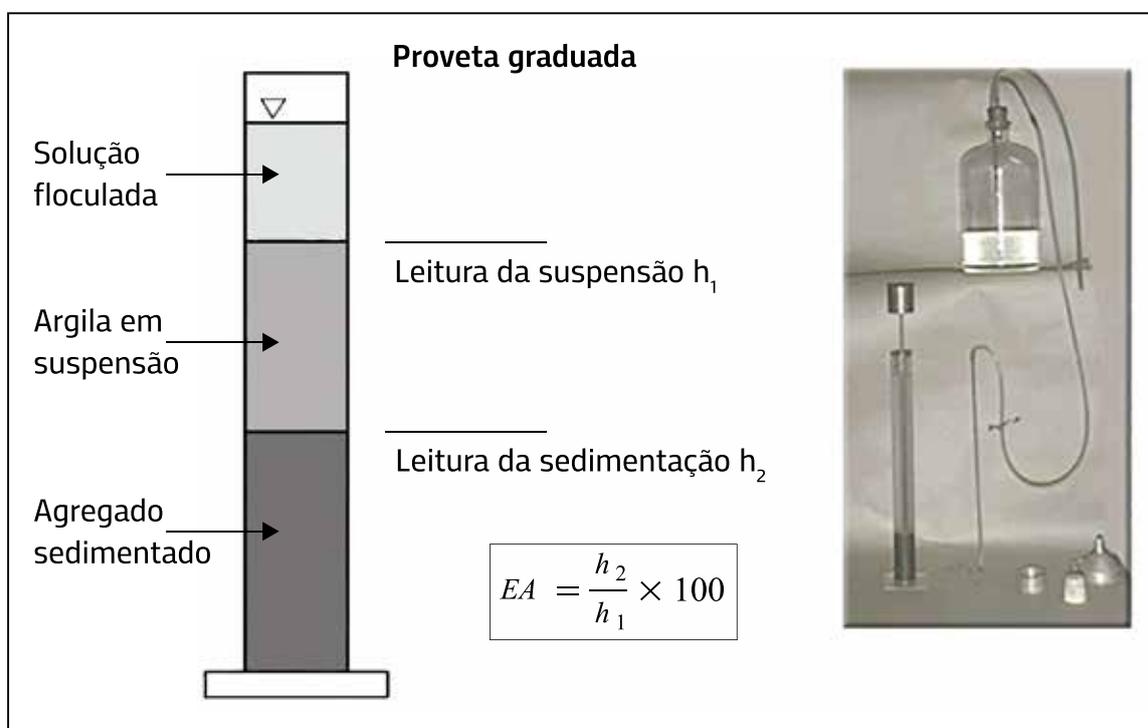
Fonte: Acervo dos autores.

4.5 Equivalente de areia

Muitas vezes se utilizam areias naturais ou artificiais, de rios ou britadas, para compor as misturas asfálticas. Visando analisar se esses materiais contêm partículas de argila, foi criado há muitas décadas o ensaio denominado de equivalente de areia. Tem por finalidade a identificação de finos plásticos no agregado miúdo, e na figura 4.15 apresenta-se o esquema deste ensaio.

Consiste em colocar o material a ser testado numa proveta própria com solução padronizada; deixar em repouso; agitar; ler a altura da suspensão (h_1) e da sedimentação (h_2). Para misturas asfálticas, em muitas especificações de serviço aceita-se o material que apresente EA > 55%.

Figura 4.15 – Esquema do ensaio equivalente de areia e exemplo de equipamento



Fonte: Acervo dos autores.

No critério norte-americano, o limite mínimo do equivalente de areia é dependente do nível de tráfego: valor mínimo de 40 para baixo tráfego, de 45 em tráfegos superiores a 3 milhões e inferiores a 30 milhões de ESAL, e de 50, em tráfegos superiores a 30 milhões de ESAL. No critério norte-americano, o limite mínimo do equivalente de areia depende do nível de tráfego como mostra a tabela 4.4.

Na Europa, o ensaio de equivalente de areia é determinado de acordo com a norma EN 933-8. Os limites estão apresentados na norma EN 18545, Agregados – elementos de definição, conformidade e codificação, não dependem do tipo de mistura, devendo apresentar valores de 55% no mínimo.

Tabela 4.4 – Requisitos Superpave de equivalente de areia

Tráfego Nx10⁶ (AASTHO)	Equivalente de areia mínimo
< 0,3	40
< 1	40
< 3	40
< 10	45
< 30	45
< 100	50
≥ 100	50

Fonte: Elaborada pelos autores.

4.6 Análise granulométrica das frações

O DNIT adota a seguinte escala granulométrica, considerando as seguintes frações de solos e britas:

- a) pedregulho: é a fração do solo que passa na peneira de 3" e é retida na peneira de 2,00mm (número 10);
- b) areia: é a fração do solo que passa na peneira de 2,00mm (número 10) e é retida na peneira de 0,075mm (número 200); subdividida em: areia grossa: é a fração compreendida entre as peneiras de 2,0mm (número 10) e 0,42mm (número 40) e areia fina: é a fração compreendida entre as peneiras de 0,42mm (número 40) e 0,075mm (número 200);
- c) silte: é a fração com tamanho de grãos entre a peneira de 0,075mm (número 200) e 0,005mm;
- d) argila: é a fração com tamanho de grãos abaixo de 0,005mm (argila coloidal é a fração com tamanho de grãos abaixo de 0,001mm).

Para obter uma amostra para a realização do ensaio de granulometria é importante o quarteramento de uma porção representativa do todo, de tamanho suficiente para fazer o ensaio de peneiramento. A separação desta porção pode ser feita por repartidor de amostras ou por quarteramento de uma pilha de agregados, conforme indicado na figura 4.16.

Figura 4.16 – Exemplo de repartidor de amostra de agregado, quartejamento de pilha e peneiramento

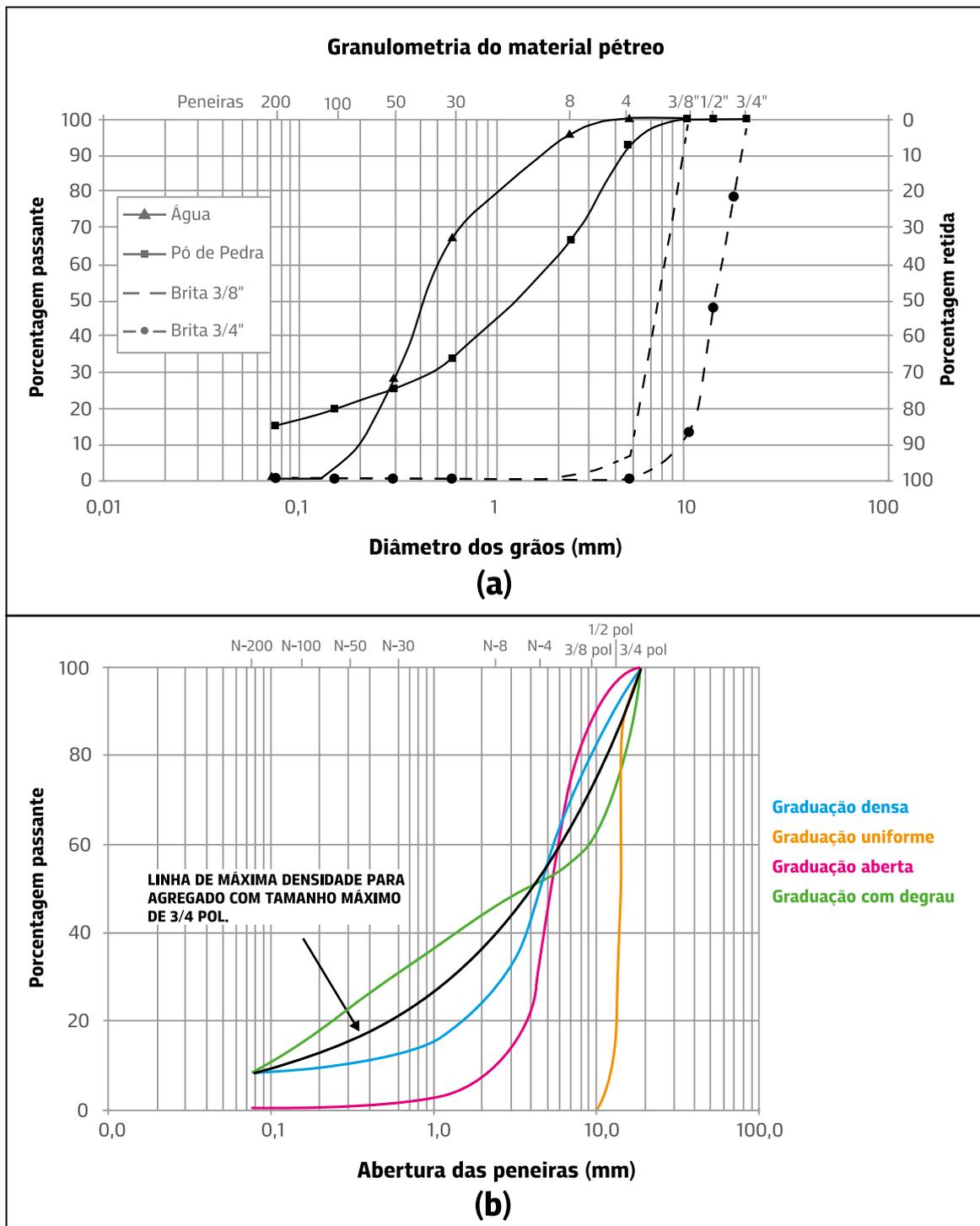


Fonte: Acervo dos autores.

A análise granulométrica consiste na determinação das porcentagens, em peso, das diferentes frações constituintes da amostra, feita em peneiras de malha quadrada de aberturas padronizadas, consideradas equivalente a certos diâmetros. Com os resultados obtidos no ensaio de granulometria traça-se a curva granulométrica em um diagrama semilogarítmico que tem como abcissa os logaritmos das dimensões das partículas e como ordenadas as porcentagens, em

peso, de material que tem dimensão média menor que a dimensão considerada (porcentagem de material que passa). Segundo a forma da curva, distinguem-se os seguintes tipos de granulometria: uniforme; densa ou bem graduada; mal graduada ou aberta, ou com degrau, conforme indicado na figura 4.17.

Figura 4.17 – Exemplo de representação das granulometrias de agregados (a) individuais (b) agrupados considerando a composição pretendida (densa, uniforme, aberta, descontínua ou com degrau)



Fonte: Bernucci et al., 2010.

A amostragem do material de enchimento ou fíler para os ensaios deve ser representativa, evitando grumos. O material de enchimento pode ser resultante do próprio pó de pedra da britagem da mesma pedreira que gerou os agregados graúdos, podem ser resíduos diversos, tais como cinzas, ou pode ser um material industrializado como o cimento Portland ou cal. Para obter a granulometria completa em geral é preciso utilizar peneiras com aberturas menores do que a peneira 200 ou se fazer a sedimentação ou ainda utilizar o granulômetro a laser.

Para os materiais cimento ou cal, a densidade real pode ser feita utilizando o frasco de Le Chatelier. Utilizam-se: balança com precisão de 0,01g; recipiente; funis de haste longa e curta; peneira #0,15mm; termômetro com precisão de 0,5°C; banho termorregulador, cujo nível da água atinja a marca de 24cm³ da graduação do frasco de Le Chatelier quando imerso. A temperatura durante o ensaio não deve variar mais que 0,5°C. Utiliza-se um líquido não reagente com o cimento (xilol, querosene ou nafta).

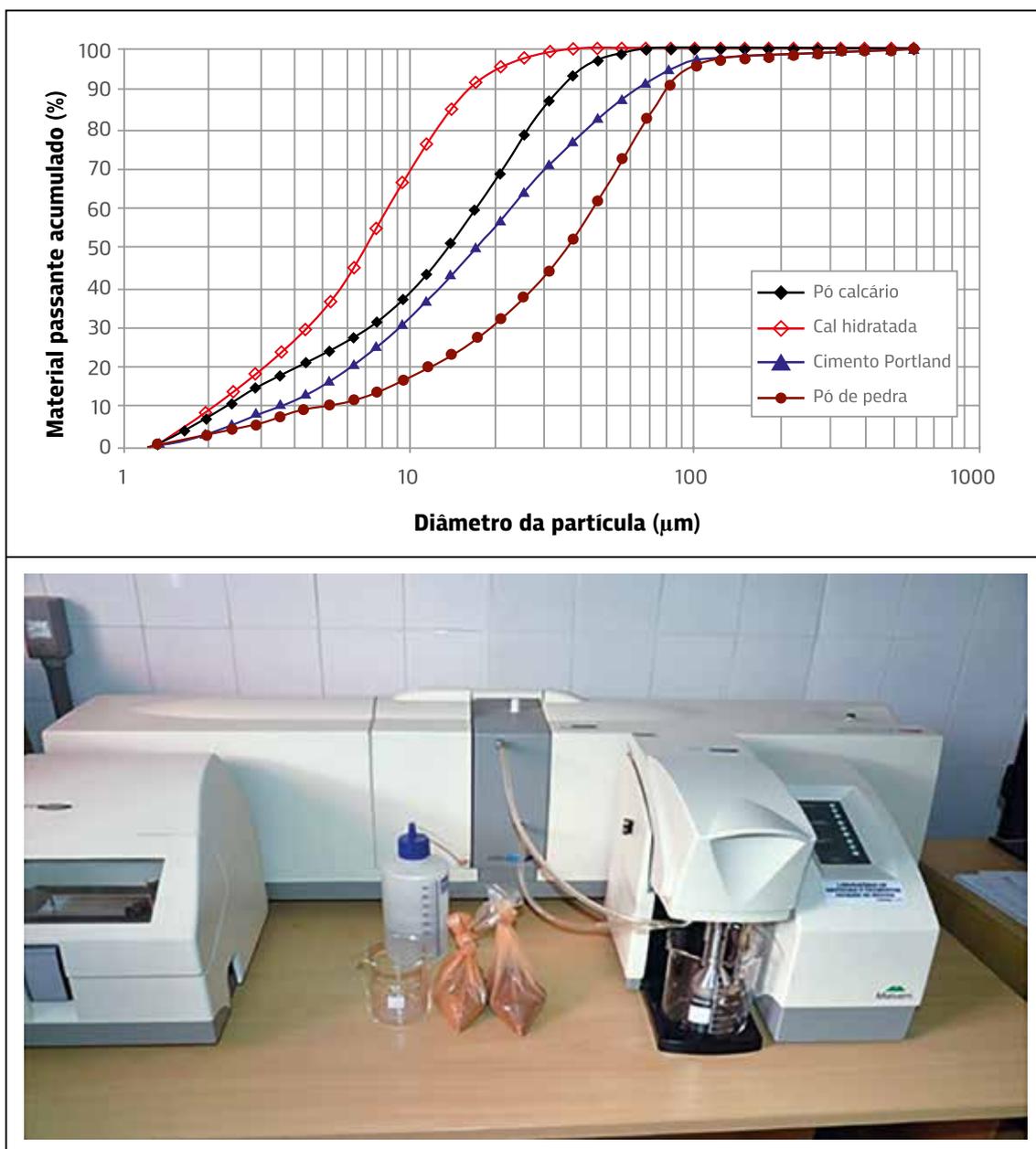
Para esses materiais, cimento ou cal, é também muito importante conhecer a granulometria completa visto que frações muito finas podem ser incorporadas ao ligante asfáltico, modificando-o. A superfície específica dessas frações muito finas também tem relevância na composição da mistura asfáltica. O equipamento de avaliação das características granulométricas a laser (granulômetro) permite obter a granulometria completa abaixo da peneira número 100 e, também, uma estimativa da superfície específica (figura 4.18).

Motta e Leite (2000) confirmaram a necessidade de se determinar a graduação do fíler, abaixo da peneira 75µm e, ainda, determinar a quantidade ótima do CAP em função da proporção de material menor que 20µm presente no fíler. Consideram imprescindível a incorporação de ensaios adequados nas especificações para estudo do fíler em termos de granulometria. A formação de banco de dados e estudos mais aprofundados sobre a influência do fíler em misturas possibilitará o estabelecimento de limites do teor do fíler e do pó para a dosagem correta de misturas brasileiras de vários tipos, considerando as diferenças de utilização e a compatibilização mecânica de toda a estrutura.

Leite e Motta (2002) avaliaram a adição de fíler nos mástiques em função do seu tipo e quantidade. Os resultados obtidos quanto às propriedades do mástique relacionados à resistência à deformação permanente foram que a adição de qualquer tipo dos fíleres estudados resultou em aumento do ponto de amolecimento, redução de penetração, aumento da viscosidade a 60°C e 135°C aumentando a resistência à deformação permanente. Quanto aos mástiques derivados de CAP 40, o aumento da resistência parte de grau de desempenho PG 70 podendo alcançar valores superiores a 88°C. Para uma mesma razão fíler/ligante (F/L), a cal hidratada apresentou maior enrijecimento do mástique em comparação com outros fíleres, em qualquer um dos ensaios de consistência realizados, enquanto o cimento e o pó de pedra apresentaram comportamento semelhante. As adições na razão F/L de 0,7 e 1,4 significaram grau de desempenho Superpave PG de 70 a 76°C, respectivamente. A resistência à deformação permanente de mástiques é conseguida pela adição de qualquer um dos fíleres estudados e principalmente pela cal hidratada, sendo que em função de sua atividade e do seu tamanho de partícula, sua adição pode ser efetuada em menor quantidade que os demais.

Na Europa, a norma EN 18545, Agregados – elementos de definição, conformidade e codificação, inclui o poder de rigidez do filler, como uma das propriedades a serem controladas. Os ensaios contidos neste critério de rigidez do filler são o azul de metileno, determinado de acordo com a norma EN 933.9, vazios de Rigden, conforme norma EN 1097.4 e aumento de ponto de amolecimento do mástique em relação ao ligante, por introdução do filler. Os valores limite são de 10mg/kg máximo para azul de metileno, faixa de 28 a 45 para os vazios de Rigden e a faixa de 8 a 25 para a diferença de ponto de amolecimento entre o mástique e o ligante.

Figura 4.18 – Granulômetro a laser para obtenção da granulometria abaixo da peneira número 100 e exemplo de resultados de quatro materiais de enchimento



Fonte: Acervo dos autores.

O cimento e o pó de pedra apresentaram comportamento semelhante no estudo de Leite e Motta (2002). As adições na razão F/L de 0,7 e 1,4 significam grau de desempenho Superpave PG de 70 a 76°C, respectivamente, enquanto a razão 2,1 passa para PG de 82°C. Pelos critérios franceses a adição da razão F/L igual a 2,1 para qualquer um dos fileres estudados acarreta aumento de ponto de amolecimento de mais que 20°C não devendo ser empregada, visto que ultrapassa o limite da especificação francesa. A adição de cal hidratada na razão de 1,4 – ainda dentro da faixa permitida pelo critério Superpave – se situa bem perto deste limite europeu, tendo que ser vista com restrições. Ao se utilizar o CAP 40, a razão 1,4 de F/L já se situa fora dos padrões franceses para a cal hidratada.

Vários autores se referem à importância do filer no comportamento das misturas asfálticas. Este é um ponto que vem tendo atenção há muitos anos como pode ser visto em Pinilla (1965), Anderson et al. (1992), Santana (1995), Cavalcante e Soares (2001), Ribeiro Filho et al. (2001), entre muitos outros.

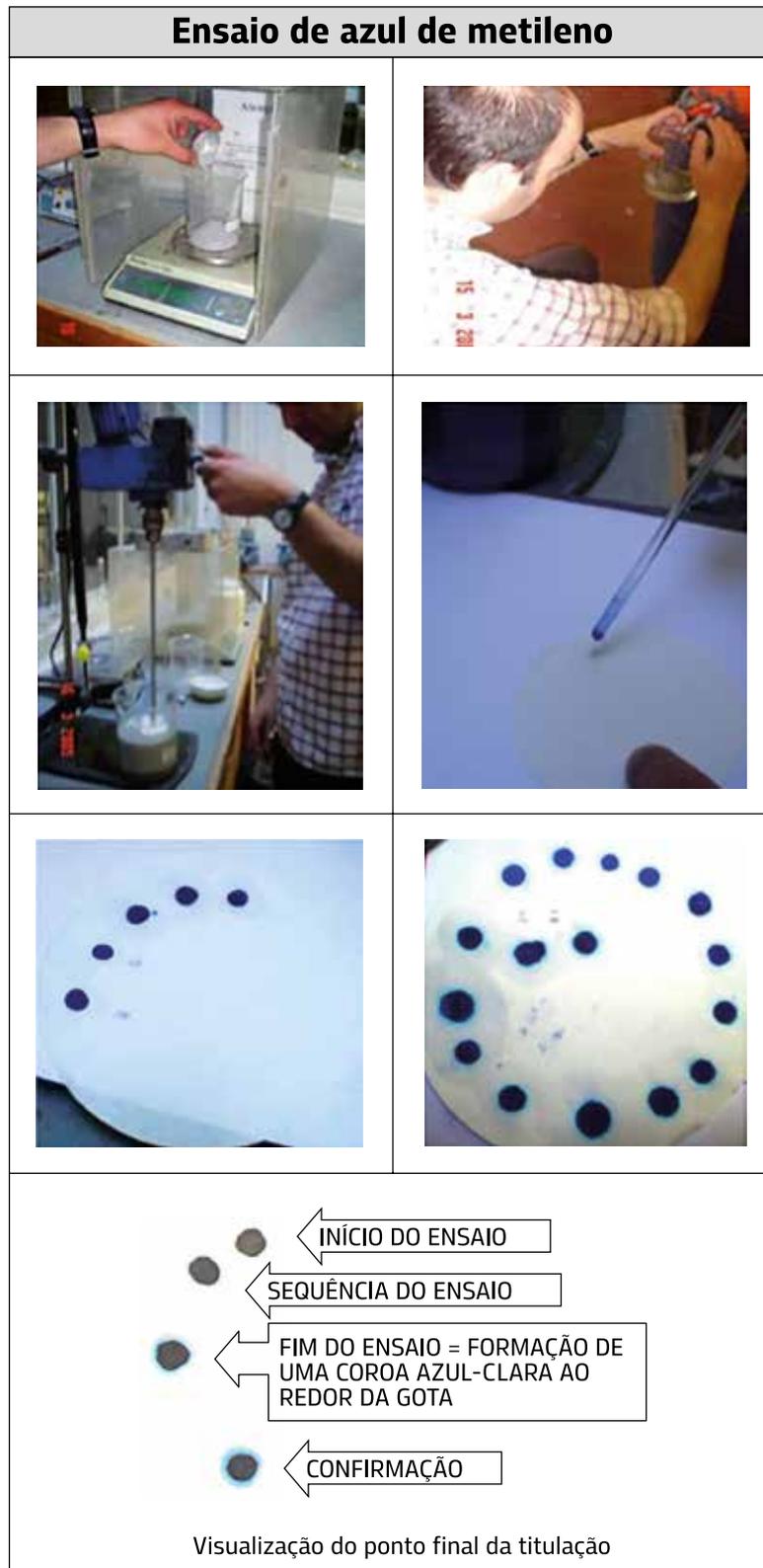
O ensaio de adsorção do azul de metileno também é utilizado para a verificação das características das partículas finas dos agregados, sendo um critério de qualidade. A figura 4.19 mostra alguns aspectos do ensaio. A figura 4.20 mostra como se determina o final da titulação. Este ensaio em geral é utilizado na seleção de agregados para microrrevestimento asfáltico e verificação de presença de argilas. A norma Arteris T-330-07 (2011) descreve os procedimentos do ensaio.

Na Europa, a limpeza das areias empregadas nas misturas asfálticas é controlada pelos ensaios de equivalente de areia e azul de metileno, determinados conforme normas EN 933.8 e 933.9 respectivamente. Os limites estabelecidos na norma EN 18545, Agregados – elementos de definição, conformidade e codificação, não dependem do tipo de mistura, devendo apresentar valores máximo de 2mg/kg para azul de metileno e mínimo de 55% para equivalente de areia.

Nas misturas asfálticas usadas como camada de base e em baixo volume de tráfego (classe B), o valor de equivalente de areia é 50 mínimo e o azul de metileno é de 1,5 máximo, enquanto nas misturas asfálticas (classe A) de maior volume de tráfego, o valor de equivalente de areia mínimo é de 60 e o de azul de metileno máximo é 1 (Huet, 2014). Shell (2015) indica que o ensaio de azul de metileno é realizado conforme a norma EN 9339 Anexo A, para a fração fina dos agregados.

O "estado de limpeza" de um agregado, definido pela quantidade relativa de elementos finos de natureza argilosa ou orgânica, no caso dos agregados de granulometria miúda, ou de qualquer natureza, é um aspecto que deve ter especial atenção. Para a grande maioria das aplicações rodoviárias, é a característica que pode interferir de forma mais significativa sobre a qualidade dos produtos onde são incorporados. Este ensaio de azul de metileno pode determinar a presença de inorgânicos prejudiciais à qualidade, inviabilizando o emprego do material.

Figura 4.19 – Etapas do ensaio de azul de metileno



Fonte: Acervo dos autores.

5. CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DE AGREGADOS

Para verificar a qualidade do agregado para o uso de misturas asfálticas, os órgãos de controle têm especificações que exigem ensaios que avaliem a resistência mecânica dos grãos, sendo os mais comuns: abrasão Los Angeles, Treton, esmagamento, Micro Deval e polimento. Esses ensaios, assim como outros, são utilizados para verificação do comportamento dos agregados sob a ação dos esforços aos quais serão submetidos e assim evitar resultados indesejados no desempenho das misturas asfálticas.

Exemplos brasileiros de análise dos efeitos de cada tipo de esforço provocado em uma dessas configurações de ensaio na forma, textura e angularidade dos agregados de algumas pedreiras podem ser vistos em Alves (2014) e Trotta (2020), entre outros.

Os ensaios mecânicos induzem diferentes mecanismos de degradação, em função do tipo de rocha, que provocam mudanças das partículas e, portanto, definir critérios equivalentes do que é aceitável ou não é uma condição difícil de ser "universalizada". Assim, há necessidade de conhecer as particularidades geológicas dos agregados para a avaliação adequada de seu comportamento em projetos de engenharia, de forma tal que a avaliação de pedreiras geologicamente heterogêneas pode maximizar a operação de britagem e minimizar as mudanças na qualidade das partículas, produzindo uma maior variedade de agregados de um mesmo local (Trotta, 2020).

Vale salientar que a manipulação dos agregados pela ação dos equipamentos utilizados nas usinas e obras, exerce esforços que geram desgastes sobre os grãos. Assim, pode ocorrer alteração da granulometria, da rugosidade ou textura e da forma dos grãos, além de, eventualmente, serem criadas microfissuras que geram pontos frágeis nas misturas asfálticas.

5.1 Abrasão Los Angeles

A abrasão ocorre no agregado grosso durante todo o processo de manipulação presente na produção das misturas asfálticas durante o processo de usinagem, nos serviços de execução da camada do revestimento asfáltico e pela ação do tráfego. Espera-se que o agregado apresente qualidade abrasiva para resistir a quebras, degradação e desintegração, visto que, nas camadas superiores do pavimento, ocorrem mais esforços que nas camadas inferiores.

Para simular os esforços aos quais o agregado gráudo será submetido, o ensaio de abrasão Los Angeles é comumente utilizado no Brasil, por tradição, por ser fácil de executar, rápido e objetivo, apesar de não representar exatamente o tipo de esforço do campo. Em muitas especificações, esse ensaio é o único critério mecânico para seleção de agregados para o uso na pavimentação asfáltica.

O ensaio é realizado colocando-se uma massa de agregado com mais ou menos 5.000g, considerando uma faixa de graduação preestabelecida, juntamente com uma carga abrasiva complementar, em forma de esferas metálicas padronizadas, em quantidade definida, a depender da faixa de graduação. Os agregados e as esferas são colocados no equipamento Los Angeles, mostrado na figura 5.1. Na sequência, a amostra é submetida a um número de rotações do tambor que variam entre 500 a 1.000, dependendo da faixa de graduação escolhida, com o equipamento girando numa velocidade entre 30 a 33 rotações por minuto (rpm). Após a execução do ensaio, calcula-se

a porcentagem do material que passa pela peneira #1,7mm (número 12) em relação ao percentual que passava inicialmente, sendo assim obtido o desgaste por abrasão Los Angeles:

$$LA = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100$$

Onde: LA = perda por abrasão Los Angeles (%), m_i = massa inicial, m_f = massa final.

Para este ensaio, quando se estuda uma jazida ou pedreira para fins de serviços de pavimentação e ainda não se sabe em qual serviço será usado o material, é comum utilizar a faixa de graduação "A" do ensaio. Porém, se o agregado já tiver seu uso definido, ou seja, o tipo de serviço onde será utilizado, e a faixa de trabalho, o interessado pode executar o ensaio em outra graduação como cita o item 5.1 da norma DNER-ME 035/98 – Agregado – determinação da abrasão Los Angeles, destacado a seguir:

A representatividade deste ensaio será intimamente ligada à granulometria do material ensaiado, portanto a graduação escolhida deverá ser aquela de granulometria mais próxima possível que deverá ser utilizada na obra. O ensaio poderá, entretanto, ser executado em outra graduação, a critério dos interessados.

No entanto, pela diversidade dos tipos de rochas que são encontradas no extenso território brasileiro, algumas regiões, a exemplo do Rio de Janeiro, apresentam muitas britas que não atendem aos limites das especificações brasileiras para o ensaio de abrasão Los Angeles, que em camadas de revestimento e base ficam entre 40 a 55% (Bernucci et al., 2010).

Nesses casos específicos, devido à ausência de agregado na região, o DNIT chegou a autorizar o uso de agregados que ficavam com valores entre 55 a 65% (Marques, 2001), porém, monitorando os trechos, além de realizar pesquisas com um conjunto de ensaios complementares para avaliar a resistência mecânica. Nessas situações, o agregado deve ser avaliado criteriosamente de comum acordo com o órgão contratante da obra, observando se o agregado é realmente o único disponível na região, se está livre de materiais deletérios, além da análise de outros ensaios, evitando escolhas equivocadas, como mostra a foto da figura 5.2 a seguir.

Contudo, a qualidade de uma mistura ou outro revestimento asfáltico depende diretamente da garantia da estrutura pétreo estudada e dosada para atender aos esforços do tráfego. Para que isso aconteça, é de suma importância garantir que a granulometria, a forma e a rugosidade do agregado não mudem de maneira a interferir na qualidade da mistura asfáltica, daí a importância do ensaio de abrasão Los Angeles.

Este ensaio é especialmente importante para agregados destinados aos tratamentos superficiais.

Figura 5.1 – Exemplo de equipamento Los Angeles e passos do ensaio



Fonte: Acervo dos autores.

Figura 5.2 – Agregado após abrasão Los Angeles, faixa A, LA = 83% (material indesejado)



Fonte: Acervo dos autores.

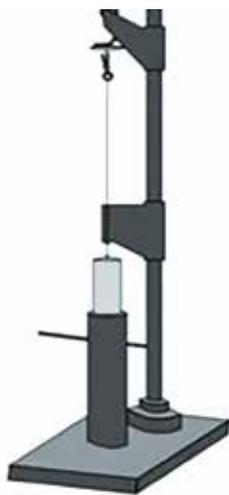
5.2 Treton

A norma DNER-ME 399/99 fixa o método para se determinar a resistência ao choque de amostra de agregados em granulometria especificada, submetida a impactos de um martelo padronizado, atuando dentro de uma guia, conforme indicado na figura 5.3. Todas as características do equipamento estão descritas na norma citada.

A amostra é constituída de 15 a 20 partículas selecionadas, cúbicas, angulosas e de mesmo tamanho, passando na peneira de 19mm e retidas na peneira de 16mm. Com um martelo de 14,9kg são aplicados 10 golpes em queda livre a uma altura de 39,37cm. Após este impacto, pesa-se o material retido na peneira de 1,7mm. A perda é calculada em porcentagem entre o peso retido e o peso total da amostra ensaiada.

Como se faz a porcentagem do peso retido, quanto maior o resultado do ensaio melhor o material, ao inverso do que se expressa no ensaio Los Angeles.

Figura 5.3 – Ensaio Treton: equipamento e passos do ensaio



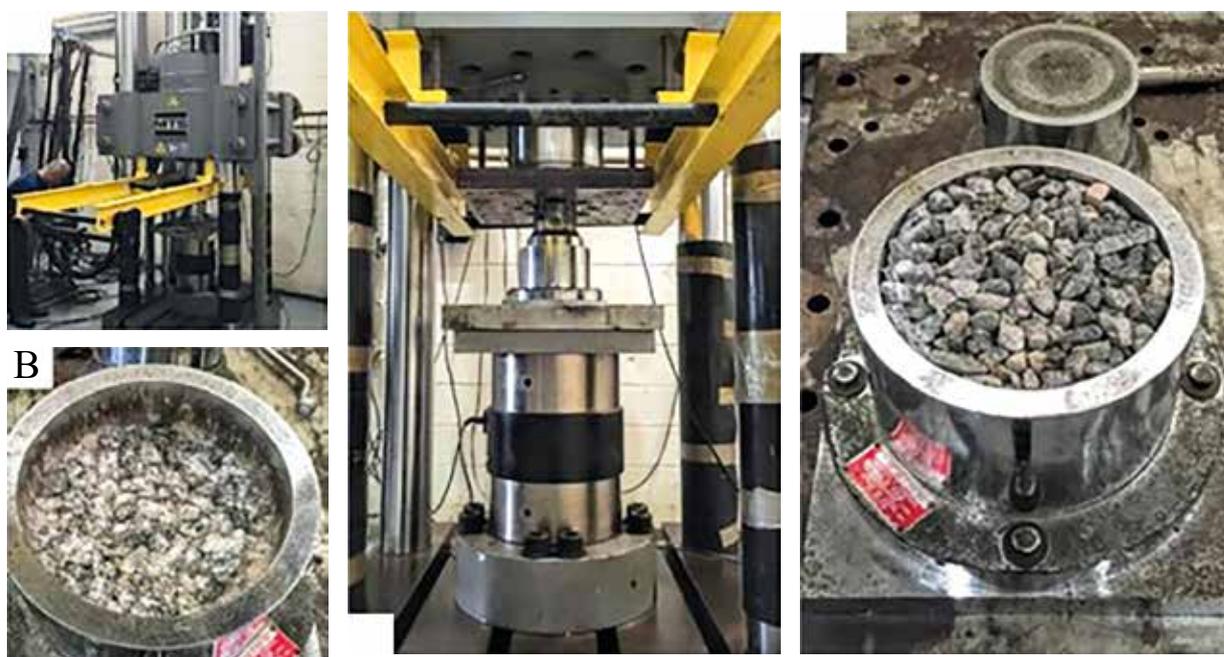
Fonte: Acervo dos autores.

5.3 Esmagamento

O ensaio de esmagamento mede a resistência do agregado, entre as peneiras de 12,5 e 9,5mm, submetido à compressão de uma carga de 40tf, aplicada uniformemente sobre os agregados colocados dentro de um cilindro. A razão de carregamento é de 4tf/min. Determina-se a porcentagem de material retido na peneira de 2,5mm, após a aplicação total da carga (figura 5.4). A norma DNER-ME 197/97 descreve esse procedimento.

Como é um ensaio definido para expressar a porcentagem de material retido, quanto maior esse valor, melhor o agregado.

Figura 5.4 – Ensaio de esmagamento



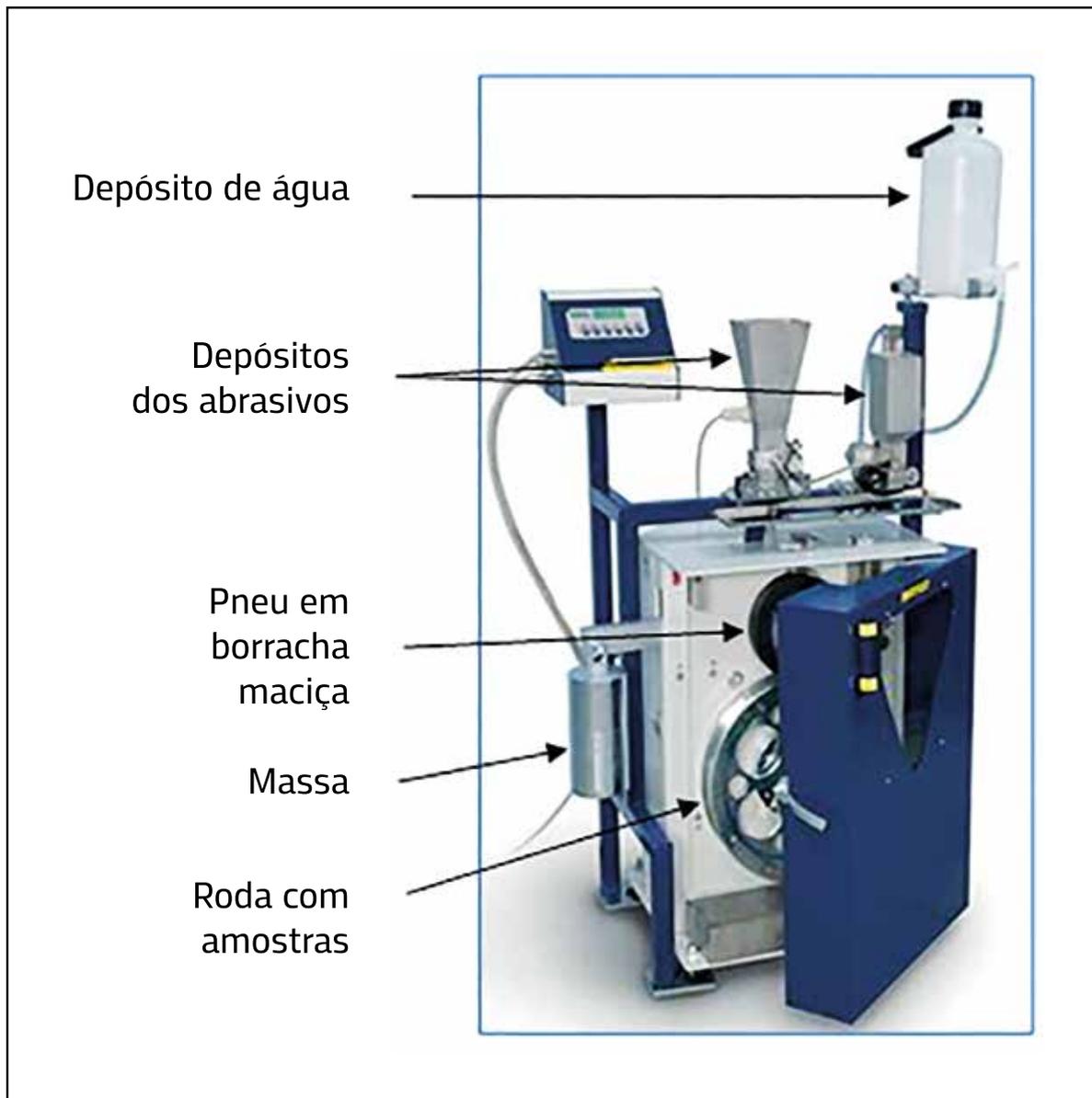
Fonte: Acervo dos autores.

5.4 Polimento

É um ensaio muito importante, no entanto não se tem o hábito de executá-lo no país, não se tendo notícia de laboratório de pavimentação que disponha desse equipamento. Pazos (2015) apresenta alguns valores deste ensaio para dois agregados brasileiros (seixo rolado e brita) avaliados em sua pesquisa, mas os ensaios foram realizados em um laboratório da Costa Rica.

Na figura 5.5 mostra-se um exemplo de equipamento usado para avaliar a resistência ao polimento do agregado grosso para camadas de revestimento segundo a norma europeia EN 1097-8 – Ensaio de polimento acelerado. Este ensaio permite avaliar a perda de rugosidade ou textura superficial das partículas de agregado graúdo, dado por coeficiente de polimento acelerado. Alguns limites usados em Portugal são mostrados na tabela 5.1.

Figura 5.5 – Equipamento para ensaio de polimento acelerado de agregados



Fonte: Acervo dos autores.

Tabela 5.1 – Interpretação do ensaio de polimento acelerado da norma europeia

Coeficiente de polimento acelerado (PSV)	Classificação	Interpretação
< 0,35	Mau	Não deverá, em princípio, ser empregado isoladamente em camadas de desgaste
0,35 a 0,45	Regular	Só deverá ser empregado em condições de tráfego e traçado favoráveis
0,45 a 0,55	Bom	A utilizar em condições normais de traçado e tráfego
> 0,55	Muito bom	Recomenda-se a sua utilização quando as condições de traçado e tráfego são desfavoráveis (curvas, cruzamentos, velocidades elevadas, tráfego intenso)

Fonte: Elaborada pelos autores.

5.5 Micro Deval

Este ensaio também não é ainda muito utilizado no Brasil, mas já começa a ser citado em pesquisas universitárias, sendo que em muitos países tem sido utilizado como alternativa ao ensaio Los Angeles. A norma europeia EN 1097-1 descreve o equipamento e o ensaio, que também mede a resistência ao desgaste ou abrasão dos agregados graúdos. É muito utilizado para seleção de agregado para revestimentos asfálticos.

Consiste em solicitar a amostra de agregados em tambores apropriados, com presença de esferas de aço e água, utilizando 12.000 rotações a 100RPM. O coeficiente Micro Deval é calculado por diferença de 500g da amostra inicial e o peso após as rotações da massa retida na peneira de 1,6mm. Na figura 5.6 são mostrados os passos do ensaio e o equipamento.

No Brasil, a UFC dispõe de um equipamento para esse tipo de ensaio. Cavalcanti (2016) mostra resultados do efeito da degradação de agregados em parâmetros de forma e textura utilizando o Micro Deval e o Los Angeles, analisados com o processamento digital de imagens (PDI). Observou como a granulometria tem influência nos parâmetros de forma e textura durante o processo de abrasão e polimento dos agregados e, como o ensaio Micro Deval pode utilizar água no processo de desgaste, avaliou o resultado seco e com água. Concluiu que a presença de água influenciou de modo diferente a degradação do agregado em função do tamanho das partículas e grãos maiores têm menor redução de massa, e a esfericidade não mudou após o polimento com Micro Deval. No Los Angeles, os agregados analisados não tiveram alteração de textura, mas se tornaram mais esféricos.

Figura 5.6 – Equipamento para o ensaio Micro Deval de abrasão dos agregados graúdos



Fonte: Acervo dos autores.

5.6 Valores admissíveis dos ensaios de resistência mecânica dos agregados

Como visto na descrição dos ensaios de Los Angeles, Treton, esmagamento e Micro Deval, cada um utiliza uma fração diferente do agregado a ser testado, impõe esforços diferenciados, e calcula o resultado considerando diferentes peneiras e porcentagens retida ou passante.

Por exemplo, os ensaios LA e Micro Deval são ambos de tambor, onde a degradação ocorre girando os agregados junto com esferas de aço. A abrasão LA testa agregados secos, enquanto o Micro Deval testa agregados úmidos ou encharcados. Os resultados de pesquisas sugerem que os agregados são menos suscetíveis à degradação quando são embebidos em água. Também existem diferenças significativas entre o tamanho das esferas de aço usadas e a distância da queda das esferas de aço nos dois ensaios de abrasão. As esferas de aço usadas na abrasão LA têm 48mm de diâmetro, enquanto no Micro Deval têm 9,5mm de diâmetro. As esferas de aço dentro do tambor são giradas e deixadas cair a uma distância igual ao diâmetro do tambor e a abrasão LA usa um tambor maior que o Micro Deval. Devido à combinação de esferas de aço mais pesadas e à maior distância de queda, a abrasão LA impõe uma carga de impacto maior aos agregados, resultando em mais degradação do que durante o Micro Deval. O teste de abrasão LA requer cerca de 5kg de agregado, enquanto o Micro Deval exige apenas 1,5kg para ser inserido no tambor. O teste de abrasão LA, portanto, requer mais que o triplo da quantidade de agregados. Além disso, a peneira usada para o ensaio de abrasão LA (1,7mm) é maior que a peneira usada para o Micro Deval (1,18mm). Portanto, os fragmentos têm a possibilidade de passar pela peneira maior, causando uma maior porcentagem de perda de agregados com o ensaio de abrasão LA.

Alguns autores estudaram a correspondência entre os resultados desses ensaios. Citam-se, a seguir, alguns exemplos desses estudos.

Resultados de comparação entre os ensaios Los Angeles, Treton, esmagamento e Micro Deval para pedreiras de diferentes geologias podem ser vistos em Trotta (2020). Ele explorou a influência de propriedades geológicas nas características de agregados graúdos de um basalto, um metacalcário e um gnaisse migmatítico. Fez análises quantitativas da química e mineralogia e identificou particularidades petrográficas visando explorar eventuais correlações. Avaliou a heterogeneidade dos agregados graúdos, e seu comportamento físico, mecânico e morfológico a partir da quantificação da degradação de partículas utilizando a técnica de processamento digital de imagens (PDI). Uma das conclusões dessa dissertação foi que, embora tenham tido padrão semelhante de perda de massa para todas as rochas avaliadas, os ensaios Micro Deval, Los Angeles, Treton e esmagamento não são equivalentes quanto ao tipo de degradação mecânica induzida sobre as partículas. O ensaio Micro Deval atua predominantemente pelo mecanismo de abrasão enquanto o Treton avalia a resistência puramente por fragmentação das partículas. No meio-termo, os ensaios Los Angeles e esmagamento atuam predominantemente com fragmentação, embora a componente abrasiva seja observada.

Cuelho et al. (2007) apresentam num relatório de pesquisa do FHWA sobre a comparação entre os resultados dos ensaios Micro Deval, Los Angeles e sanidade, quanto aos limites de qualificação dos agregados para pavimentação. Concluíram que os testes Micro Deval, LA e sulfato de sódio se correlacionam bem quando os agregados têm valor percentual de perda relativamente baixo. As discrepâncias entre os três testes começam a aparecer com materiais com perdas percentuais próximas aos valores limites. A maior dispersão de dados ocorreu na comparação entre os testes de abrasão LA e sulfato de sódio. Dos três ensaios, o sulfato de sódio é o mais difícil e demorado de se executar, de pior repetibilidade e menor correlação com a durabilidade do campo. O ensaio Micro Deval tendeu a fornecer resultados mais conservadores do que LA e sulfato de sódio. Os agregados que passarem no ensaio Micro Deval provavelmente também serão aprovados no de abrasão de LA e sulfato de sódio. O ensaio Micro Deval pode substituir o de sanidade. Com base na faixa de confiança estatística de 95%, os autores sugerem que a maior probabilidade de conflitos aprovado-não aprovado ocorre quando a porcentagem de perda de uma amostra for ligeiramente maior que os critérios de aceitação do Micro Deval. Se o Micro Deval for selecionado para avaliar a durabilidade recomendam que um teste alternativo seja implementado sempre que uma porcentagem de perda estiver entre 1,0 e 1,3 vez o ponto de corte pelo Micro Deval. Em outras palavras, é sugerido um segundo teste de verificação quando a perda percentual de Micro Deval estiver entre 18 e 24%. Os métodos diferem no tratamento do agregado e, conseqüentemente, cada método produz um valor de porcentagem de perda, que é usado para distinguir entre agregado durável e agregado não durável. Para este estudo, os seguintes padrões de porcentagem de perda para reprovação foram:

- >> Micro Deval: aprovado (durável), se % de perda for menor que 18%;
- >> LA abrasão: passante (durável), se % de perda \leq 40%; e
- >> sulfato de sódio: aprovado (durável), se a perda for % \leq 12%.

Uhlig (2014) analisou 350 ensaios de impacto, usando material proveniente de 15 pedreiras diferentes da Áustria, Baviera e Boêmia, de origem ígnea, metamórfica e sedimentar. A geologia e mineralogia de todos os tipos de rochas foi determinada e descrita por difração de raios X e lâminas. Vários tipos de rochas foram separados em subclasses para identificar os motivos de possíveis variações nos resultados dos ensaios de uma pedreira ou em um tipo de rocha. A geometria das partículas de todas as amostras foi analisada antes e após o ensaio pelo dispositivo Petroscope 4D®. Assim, a forma dos grãos e a angularidade puderam ser determinadas e o efeito desses parâmetros foi considerado com relação à variabilidade dos resultados. A forma do grão, a angularidade, a composição petrográfica e a formação de subclasses são analisadas e correlacionadas com os resultados do ensaio de impacto. A composição petrográfica e a forma do grão do material influenciaram fortemente os resultados dos ensaios de impacto. O grau de arredondamento desempenha um papel secundário. A formação de subclasses mostra que uma pedreira pode mostrar propriedades diferentes em termos de comportamento mecânico e petrografia.

Assim, os valores admissíveis para cada um são diferentes, mas como são empíricos, a pergunta que surge é se haverá exata correspondência entre esses limites para seleção. O que mede cada um? Os critérios deveriam considerar também a origem do agregado?

Como ordem de grandeza, são citados em normas específicas de cada tipo de mistura asfáltica os seguintes valores:

- >> Los Angeles: $\leq 30\%$ para SMA e GG; 40 a 55% para CA (máx);
- >> Treton: 25% (ASTM 2008);
- >> Micro Deval: 17-18% para concreto asfáltico;
- >> Esmagamento: $\geq 60\%$ para concreto asfáltico (o critério é de material retido).

Os limites apresentados na norma EN 18545, Agregados – elementos de definição, conformidade e codificação, para resistência mecânica dos agregados consideram a limitação de cada um dos ensaios conforme a tabela 5.2. Quando houver uma aplicação dos agregados onde se justifique uma determinada resistência mecânica, tem-se ainda a combinação dos resultados dos ensaios de abrasão: Los Angeles – LA, Micro Deval – MDE e de polimento – PSV conforme a tabela 5.3.

Tabela 5.2 – Limites das especificações europeias para resistência mecânica

Misturas asfálticas	LA máximo	MDE máximo	PSV mínimo
A	20	15	56
B	20	15	50
C	25	20	50

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 5.3 – Limites especiais da norma europeia para resistência mecânica

Misturas asfálticas	LA (1) e (2) máximo	MDE (1) e (2) máximo	Exigência complementar LA + MDE (1) máximo	PSV (1) mínimo
A	25	20	35	56
B	25	20	35	50
C	30	25	45	50

(1) Requer cumprimento das quatro condições (LA, MDE, LA + MDE e PSV).

(2) Ensaio LA e MDE são realizados na fração 6,3 a 10.

Fonte: Elaborada pelos autores.

6. TIPOS DE COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

As camadas do pavimento devem ser capazes de suportar as cargas geradas pela ação do tráfego e das intempéries induzidas pelo ambiente onde está situada a rodovia, sem apresentar níveis inaceitáveis de trincas e deformações em curto espaço de tempo ou antes de atingir o período de projeto.

Os cenários produtivos e comerciais dos insumos destinados à pavimentação ainda apresentam algumas dificuldades, sendo uma delas o beneficiamento dos agregados, que, geralmente, não apresentam constância de forma e de tamanho das frações correspondentes a um determinado diâmetro. Resultam, assim, em composições granulométricas pouco estáveis, devido à deficiência quanto ao preenchimento gradual dos volumes de vazios formados pelas partículas de maiores dimensões. Não havendo uma padronização no beneficiamento dos granulares, as dosagens das misturas asfálticas ficam suscetíveis a resultados ruins em campo, uma vez que esqueletos granulométricos com formulação inadequada podem causar forte instabilidade às misturas.

As especificações técnicas brasileiras atualmente definem faixas granulométricas, mas não propõem nenhuma metodologia de critério técnico racional para a definição da curva granulométrica de projeto, servindo apenas como instrumento de verificação final se a curva granulométrica escolhida se enquadra em uma destas faixas.

As misturas de agregados destinadas aos concretos asfálticos e aos tratamentos superficiais são constituídas por um esqueleto mineral, com grãos de tamanho variando entre a menor abertura de peneira d (mm) e um diâmetro máximo D (mm) especificados a cada caso particular, misturado a um ligante asfáltico.

Dependendo da especificação aplicável em qualquer região específica, características funcionais como resistência a derrapagens, redução de ruído e durabilidade poderão ser trabalhadas a partir da composição granulométrica, além do atendimento aos critérios de rigidez, resistência à deformação permanente e à fadiga, que são o foco do dimensionamento do pavimento. Portanto, o desenho da mistura de agregados é muito importante, porque irá definir o comportamento estrutural da camada e tantos outros aspectos como, por exemplo, dar condições para uma rápida drenagem das águas superficiais aumentando a segurança do usuário.

Normalmente as composições de agregados que darão origem às misturas asfálticas são dosadas pelo método de tentativas. A partir de uma faixa granulométrica de referência e utilizando recursos da informática (por exemplo o programa Excel), por tentativas, propõem-se porcentagens para os agregados (brita 3/4", brita 3/8" e pó de pedra) para se obter uma curva granulométrica que se enquadre dentro dos limites dessa faixa de referência. Porém, como este é um método de tentativas por "matemática" (ou seja, admite-se que as proporções assumidas de cada fração serão compostas por partículas "perfeitas") não há garantia de que, ao se misturar os agregados reais, com suas formas irregulares e conjuntos diferenciados, se tenha precisão para atingir uma composição definida, que atenda a todos os critérios volumétricos e de comportamento estrutural.

A estruturação da granulometria de uma mistura asfáltica é importante para o desempenho do pavimento, mas nenhum material "individualmente" pode fornecer todas as características desejadas. Tem-se uma ampla gama de composições granulométricas que podem ser consideradas em projetos, dosadas e especificadas conforme os requisitos do projeto do pavimento.

6.1 Misturas asfálticas densas, semidensas e abertas

Os concretos asfálticos com granulometrias contínuas são as soluções mais adotadas nas rodovias e vias brasileiras. Graças ao arranjo de partículas bem-graduado, a quantidade de ligante asfáltico requerida para cobrir as partículas e ajudar a preencher os vazios não pode ser muito elevada, visto que a mistura necessita contar ainda com vazios com ar, após a compactação, que é 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), tipicamente.

Caso não seja atendido certo volume de vazios, as misturas asfálticas deixam de ser estáveis à ação do tráfego e, por fluência, deformam-se plasticamente de maneira significativa.

Para as misturas contínuas, a faixa de teor de asfalto em peso está normalmente entre 4,5 a 6,0% em relação ao conjunto de agregados. Dependendo da forma dos agregados, da sua massa específica, da viscosidade e do tipo do ligante, podem ter 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.

A tabela 6.1 mostra as faixas granulométricas tradicionais recomendadas pelo DNIT 031/2004- ES. Porém, está em andamento a revisão desta especificação e a proposta é mudar a referência para faixas referidas ao tamanho nominal máximo (TNM) dos agregados, conforme mostra a tabela 6.2. Essa forma de apresentação é a mais utilizada atualmente, e até no Brasil algumas concessionárias já utilizam.

Também é cada vez mais comum a utilização de uma representação gráfica da curva granulométrica selecionada pelo projetista durante a dosagem, com a escala horizontal de potência conforme indicado na figura 6.1. Essa representação permite posicionar a curva granulométrica em relação à condição de densidade máxima dos agregados, que deve ser evitada, por não incluir espaço para o ligante.

De modo geral as misturas contínuas são caracterizadas pela sua classificação granulométrica com proporções aproximadas de agregados em todas as peneiras, e têm fácil densificação. Resultam nas misturas densas. Quando adequadamente projetada e construída, uma mistura densa é relativamente impermeável. São adequadas para todas as camadas do pavimento e para todas as condições de tráfego. Funcionam bem para as necessidades estruturais, de atrito, nivelamento e correção.

Tabela 6.1 – Faixas granulométricas de concreto asfáltico

Peneira de malha quadrada	Faixas				
	Porcentagem em massa, passando				
Série ASTM	Abertura mm	A	B	C	Tolerância
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	± 3%
Tipo de camada de revestimento asfáltico		Camada de ligação	Camada de ligação ou rolamento	Camada de rolamento	

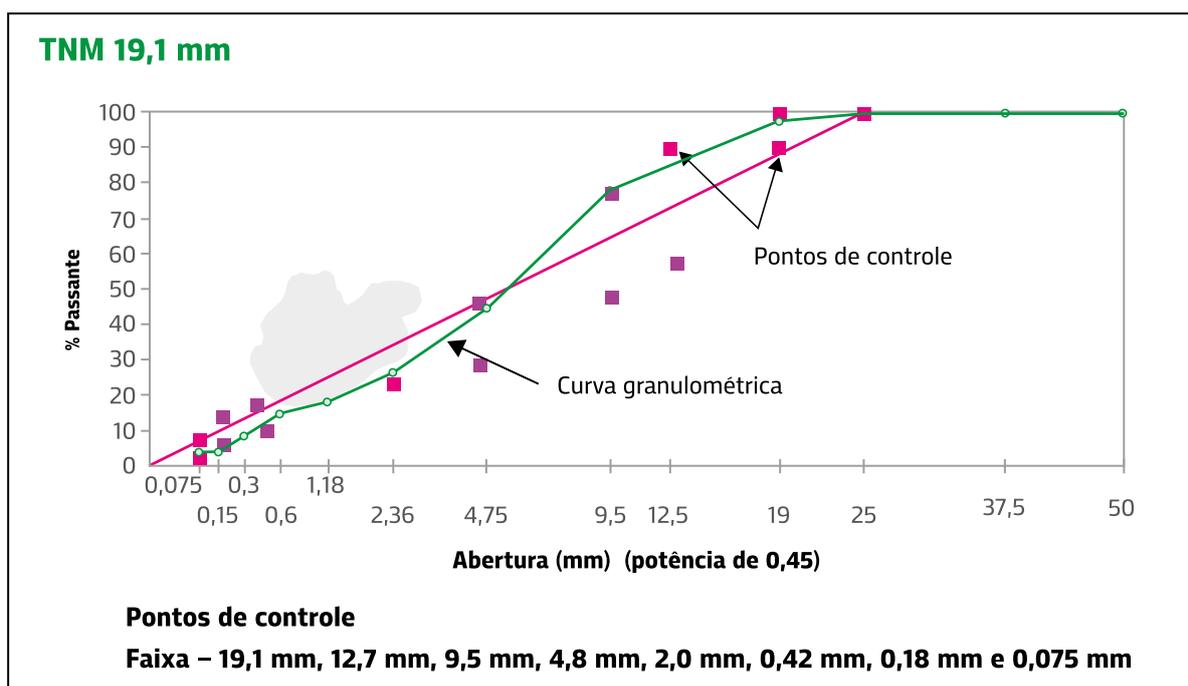
Fonte: DNIT 031/2004.

Tabela 6.2 – Faixas granulométricas por TNM
(proposta na revisão da especificação de serviço de concreto asfáltico feita em 2019)

Peneira de malha quadrada	% em massa, passando				
	Tamanho máximo nominal				
Polegada/Nº	(mm)	25,4	19,1	12,7	9,5
1 1/2"	38,1	100	-	-	-
1"	25,4	90-100	100	-	-
3/4"	19,1	75-90	90-100	100	-
1/2"	12,7	60-77	58-90	90-100	100
3/8"	9,5	50-67	44-74	58-90	90-100
Nº 4	4,8	28-40	30-47	38-55	55-90
Nº 10	2,0	17-28	21-33	26-36	28-43
Nº 40	0,42	6-16	9-18	11-21	11-24
Nº 80	0,18	3-11	5-12	5-15	5-16
Nº 200	0,075	1- 7	2-8	2-10	2-10

Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 6.1 – Representação gráfica de uma curva granulométrica de concreto asfáltico – um exemplo



Fonte: Acervo dos autores.

A relação entre o tamanho máximo do agregado e a espessura das camadas de revestimento afeta diretamente a densificação da massa asfáltica. As camadas asfálticas devem ser espessas o suficiente para dar espaço aos agregados se reorientarem e densificarem quando aplicadas as energias de compactação, mas também não tão espessas a ponto de as fibras inferiores da camada não receberem a energia necessária e não adensar. Assim, o diâmetro máximo nominal do agregado deve ser entre 1/4 e 1/3 da espessura da camada.

Algumas misturas asfálticas preparadas a frio (com emulsão asfáltica), denominadas pré-misturadas a frio (PMF) ou a quente (concreto asfáltico), com faixas granulométricas apropriadas, de acordo com a finalidade de sua aplicação, podem apresentar porcentagens de vazios maiores do que o concreto asfáltico convencional (denso), que em geral apresenta vazios baixo (entre 3 e 5%), o que visa tornar a camada de revestimento impermeável.

Conforme a faixa granulométrica e o percentual de vazios da mistura asfáltica após compactação, os pré-misturados a frio são classificados em três tipos:

a) PMF aberto = VAZIOS > 20%.

É utilizada tipicamente com granulometria aberta, tipo drenante, empregada em camada intermediária, com efeito antirreflexão de trincas de pavimentos antigos em serviços de recapeamento, por exemplo.

b) PMF semidenso = VAZIOS de 15 a 20%.

É uma granulometria denominada de semidensa por apresentar vazios um pouco menor do que a aberta, e é empregada em camada intermediária, para reforço estrutural do pavimento ou camada final de rolamento em vias de tráfego leve e médio, sendo recomendada a sua impermeabilização com capa selante.

c) PMF denso = VAZIOS = 7 a 12%.

Mistura asfáltica com característica específica de granulometria contínua (densa), composta de agregados britados graúdo e miúdo e material de enchimento, e emulsão asfáltica de ruptura lenta para melhor envolvimento dos agregados pela película de ligante asfáltico. Usada em camada intermediária ou de rolamento em rodovias e vias urbanas.

No caso de misturas a quente (uso de cimento asfáltico), serão descritas, a seguir, as misturas com granulometrias especiais, descontínuas ou uniformes, que podem ou não ser abertas (vazios elevados): CPA, SMA e gap graded.

6.1.1 CPA – camada porosa de atrito ou revestimento asfáltico drenante

As misturas asfálticas abertas do tipo camada porosa de atrito (CPA) mantêm uma grande porcentagem de vazios não preenchidos graças às pequenas quantidades de fíler, de agregado miúdo e de ligante asfáltico. O esqueleto mineral é constituído de um tamanho de grãos bastante uniforme.

Essas misturas asfálticas a quente apresentam normalmente entre 18 e 25% de volume de vazios. Na França, elas 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 por aumentarem o atrito e permitirem o escoamento das águas pelos vazios evitando a formação de lâmina d'água que possa provocar aquaplanagem.

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 os sistemas de drenagem.

A característica importante dessa mistura asfáltica é que causa:

- a) redução da espessura da lâmina d'água na superfície de rolamento e conseqüentemente das distâncias de frenagem;
- b) redução do spray proveniente do borrifio de água pelos pneus dos veículos, aumentando assim a distância de visibilidade; e
- c) redução da reflexão da luz dos faróis noturnos.

Todos esses aspectos em conjunto 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 esses revestimentos drenantes.

Porém, essa camada drenante não pode ser a única camada de revestimento tendo em vista que não tem capacidade estrutural adequada e deixaria passar a água captada para as camadas inferiores de solo, portanto é sempre executada sobre uma camada de mistura densa e estrutural.

As especificações brasileiras do DNIT recomendam para CPA cinco faixas granulométricas e teor de ligante asfáltico entre 4,0 e 6,0% – tabela 6.3.

Devido à particularidade granulométrica, a quantidade de ligante é geralmente reduzida, ficando 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 deve ter baixa suscetibilidade térmica e alta resistência ao envelhecimento.

Tabela 6.3 – Faixas granulométricas indicadas para misturas tipo CPA

Peneira de malha quadrada	Faixas						
	Porcentagem em massa, passando						
ABNT	Abertura mm	I	II	III	IV	V	Tolerância
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	5-20	8-20	± 4,0				
Volume de vazios, %	18-25						
Ensaio Cântabro, % máx.	25						
Resistência à tração por compressão diametral, a 25°C, MPa, mín.	0,55						

Fonte: DNER-ES 386/99.

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, atendendo ao volume de vazios requerido. Na figura 6.2 mostram-se alguns aspectos desse tipo de mistura asfáltica a quente.

Os agregados devem ser 100% britados e bem resistentes (abrasão Los Angeles ≤ 30%) para não serem quebrados na compactação, visto que os contatos dos agregados uns com os outros, sem a presença de mástique, propiciam tensão muito elevada durante o processo de densificação e durante o uso.

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 e adotado no Brasil desde que esse tipo de mistura começou a ser utilizado.

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 ocupação dos vazios por impurezas e poeiras, uma vez que devido a elas há redução da permeabilidade. No Brasil, nos aeroportos que utilizam este tipo de revestimento (por exemplo, aeroporto Santos Dumont, Rio de Janeiro), também há colmatação por borracha dos pneus dos aviões durante os pousos e essa limpeza é feita periodicamente, até que fica necessário substituir a camada de CPA.

Figura 6.2 – Exemplos de mistura asfáltica do tipo CPA



Fonte: Acervo dos autores.

6.1.2 Stone Matrix Asphalt (SMA)

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, filer, ligante asfáltico e fibras. A primeira aplicação no Brasil foi no autódromo de São Paulo, em 2000 (Beligni et al., 2000). Reis (2002) mostra um trecho experimental aplicado na Rodovia Anchieta e no mesmo ano um trecho foi feito na Rodovia Dutra (Chaves et al., 2002). Muitos outros segmentos se seguiram.

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.

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 6.4 (ZTV Asphalt – StB, 2001). Na figura 4.3 mostra-se uma faixa granulométrica e uma curva de projeto (Mourão, 2003).

Como comparação, na figura 6.3 mostram-se dois corpos de prova, um de SMA e outro de CA, onde fica visível a diferença das granulometrias, ambas densas, mas com proporções diferentes de agregados intermediários.

Para tráfego pesado ou solicitações especiais, as especificações restringem-se às faixas 0/11S e 0/8S. É uma camada estrutural densa. Por exemplo, Silva (2005) apresenta estudo de laboratório e de campo com um SMA 0/8S aplicado em rodovia em São Paulo.

Na União Europeia 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 6.5. As propriedades da mistura são ditadas por especificações obtidas no equipamento de compactação giratório Superpave – tabela 6.6. 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 para uso em SMA. As especificações são em geral não restritivas, empregando tanto os asfaltos modificados por polímeros como asfaltos convencionais (preferencialmente oriundos de petróleo venezuelanos).

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. Quando for utilizado asfalto de alta viscosidade (por exemplo asfalto borracha) as fibras são desnecessárias. As fibras orgânicas podem ser utilizadas também em péletes 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 norma AASHTO D 5821, deve haver 100% de agregados britados em pelo menos uma face e 90% em duas faces e abrasão Los Angeles $\leq 30\%$ (AASHTO T 96), porém há casos de sucesso com agregados britados cuja abrasão excedeu 50%.

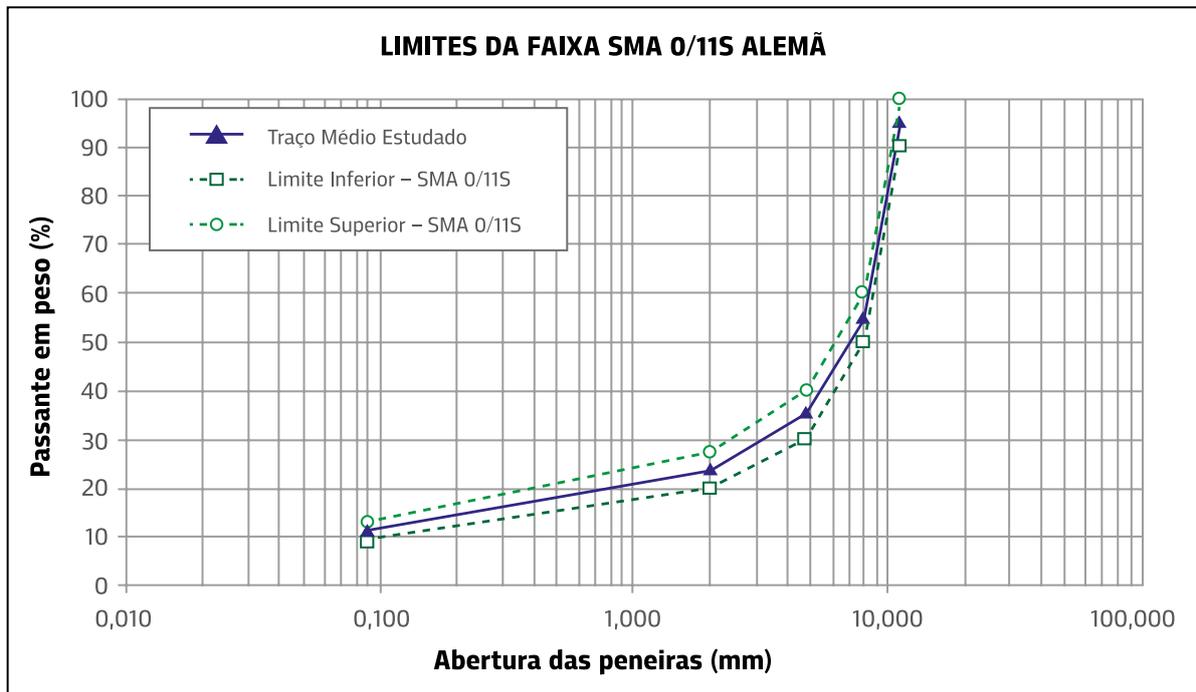
A forma dos agregados é de preferência cúbica. A absorção deve ser de $\leq 2\%$ pela AASHTO T 85; o ataque aos sulfatos de sódio de $\leq 15\%$ após cinco ciclos, e de magnésio de $\leq 20\%$, conforme a norma AASHTO T 104.

Tabela 6.4 – Especificações alemãs de misturas asfálticas SMA

Peneira	Faixas			
	Porcentagem em massa			
	SMA 0/11S	SMA 0/8S	SMA 0/8	SMA 0/5
< 0,009mm	9-13	10-13	8-13	8-13
> 2mm	73-80	73-80	73-80	60-70
> 5mm	60-70	55-70	45-70	< 10
> 8mm	> 40	< 10	< 10	-
> 11,2mm	< 10	-	-	-
Características e requisitos				
Tipo de asfalto	B65 ou PmB45	B65 ou PmB45	B80	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 Ou consumo, kg/m ²	35-40 85-100	30-40 70-100	20-40 45-100	15-30 35-75
Camada de nivelamento Espessura, mm Ou consumo, kg/m ²	25-50 60-125	20-40 45-100	-	-
Grau de compactação	> 97%			
Volume de vazios da camada compactada	< 60%			

Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 6.3 – Exemplo de faixa granulométrica SMA e granulometria de um projeto



Fonte: Mourão, 2003.

Tabela 6.5 – Especificações norte-americanas de SMA

Abertura (mm)	Faixas					
	Porcentagem em massa, passando					
	19,0 mm		12,5 mm		9,5 mm	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
25,000	-	100	-	-	-	-
19,000	90	100	-	100	-	-
12,500	50	88	90	99	-	-
9,500	25	60	50	85	100	100
4,750	20	28	20	40	70	95
2,360	16	24	16	28	30	50
1,180	-	-	-	-	20	30
0,600	-	-	-	-	-	21
0,300	-	-	-	-	-	18
0,075	8	11	8	11	12	15

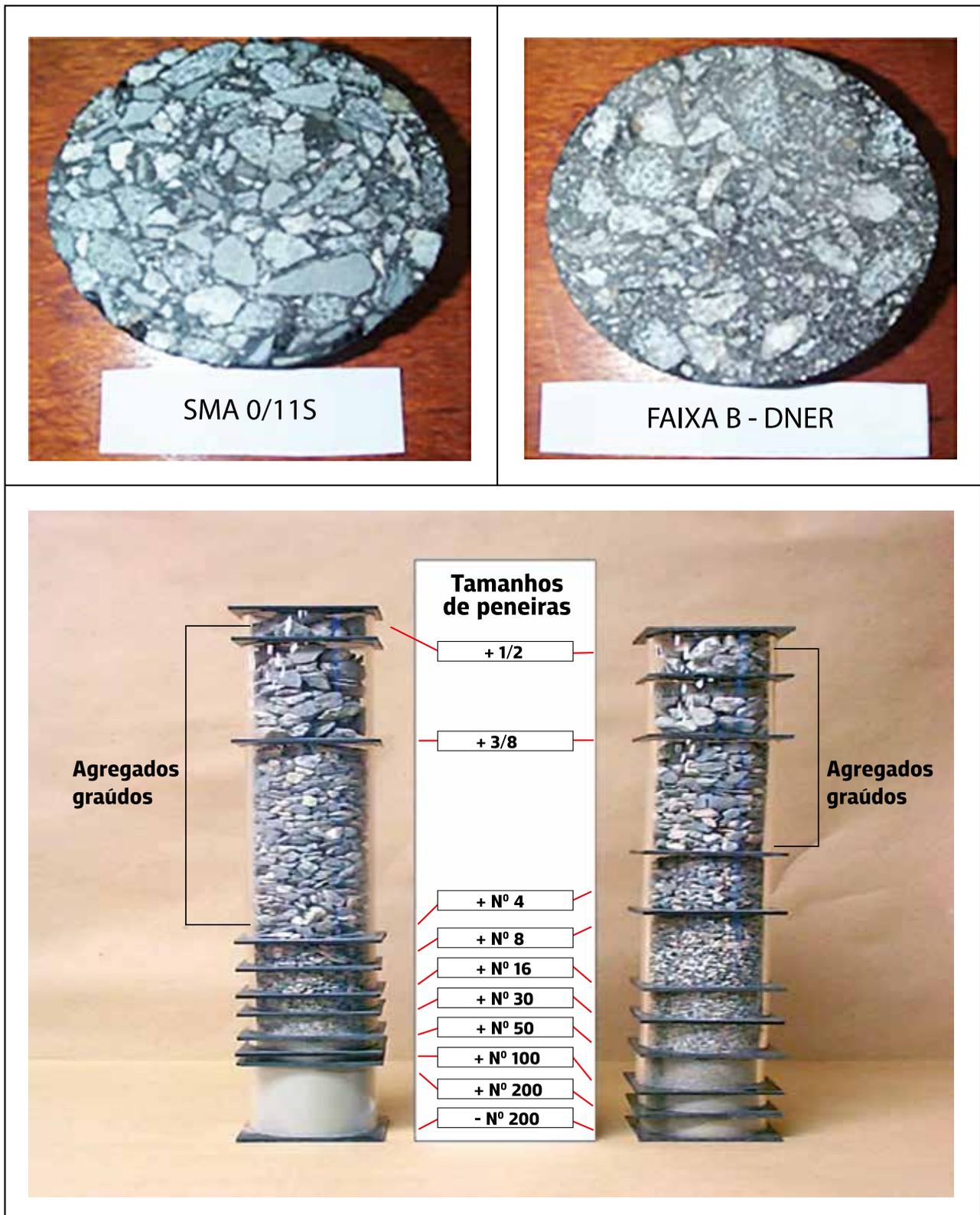
Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 6.6 – Especificação de propriedades de uma mistura do tipo SMA

Propriedade	Requisito para corpo de prova compactado no equipamento giratório – Superpave
Volume de vazios, %	4,0
VAM (vazios no agregado mineral), %, mín.	17
VCAmix	< VCAdrc
Estabilidade Marshall, N, mín.	6200
RTT – Resistência à tração retida (AASHTO T 283), % mín.	70
Teste de escorrimento (draindown) na temperatura de produção, % em peso máx.	0,30
Teor de asfalto na mistura, % mín.	6,0

Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 6.4 – Exemplo de corpos de prova de SMA e CA e composição granulométrica



Fonte: Mourão, 2003.

6.1.3 Gap graded

É uma faixa granulométrica especial que resulta em macrotextura superficial aberta ou rugosa, mas não em teor de vazios elevado. Algumas utilizações dessa faixa no Brasil vêm sendo realizadas com asfalto borracha. Esse tipo de mistura asfáltica tem sido empregado como camada estrutural de revestimento.

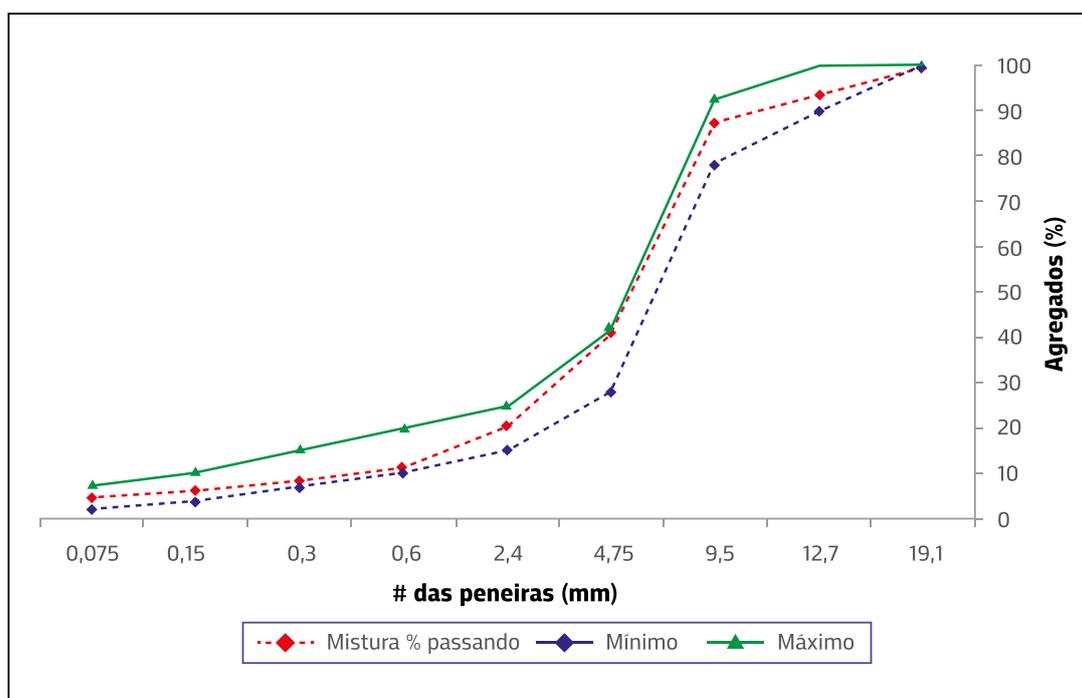
A tabela 6.7 mostra a faixa granulométrica de gap graded (GG) definida na especificação de serviço com uso do asfalto borracha do DNIT 112/2009-ES e, na figura 6.5, uma representação da faixa e de um projeto.

Tabela 6.7 – Faixa granulométrica gap graded

Peneira	Porcentagens passantes
3/4"	100
1/2"	90-100
3/8"	78-92
Nº 4	28-42
Nº 10	14-24
Nº 40	8-17
Nº 80	5-11
Nº 200	2-7

Fonte: DNIT 112/2009.

Figura 6.5 – Representação da faixa granulométrica GG de um projeto



Fonte: Acervo dos autores.

Nesta especificação DNIT 112/2009 constam as seguintes condições para os agregados:

>> Graúdo: pedra britada, escória, seixo rolado, preferencialmente britado.

- $LA \leq 50\%$.
- Índice forma $\geq 0,5$.
- Sanidade $\leq 12\%$.

>> Miúdo: areia, pó de pedra, ambos ou outro material indicado, equivalente de areia $\geq 55\%$.

>> Dano por umidade induzida: DUI $\geq 70\%$.

As misturas descontínuas, do tipo SMA ou gap graded, apresentam granulometria com a proporção 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.

6.2 Tratamento superficial

O conceito de tratamento superficial envolve a aplicação de uma única camada de agregados após a aplicação de ligante asfáltico.

As derivações da técnica passam pela aplicação de duas e até três camadas sucessivas de agregados, sempre separadas por espargimento de camada de ligante asfáltico.

Agregados e ligante asfáltico têm papéis diferentes no tratamento superficial. O ligante atua como um agente de ligação entre os agregados e evita a infiltração de água para a base do pavimento. Os agregados trabalham contra a abrasão causada por veículos na base e fornecem a textura da superfície.

Os fatores que afetam o desempenho e que devem ser considerados durante a seleção de agregados são:

- >> tamanho e graduação;
- >> forma;
- >> limpeza;
- >> abrasão.

A seleção da faixa granulométrica a ser observada pela mistura de agregados pétreos deve ser compatível com os objetivos a serem alcançados pela aplicação de tratamentos superficiais.

A natureza físico-química do agregado pode, em certos casos, conduzir a ligeiros ajustes da dosagem de ligante, mas esses desvios são pequenos e só podem ser apreciados nas condições locais.

O DNIT recomenda as faixas granulométricas indicadas na tabela 6.8 para tratamento superficial duplo, como exemplo. As características mecânicas e de forma dos grãos para serem usados em

tratamento superficial duplo pela especificação de serviço DNIT 147/2012 são as seguintes:

– os agregados podem ser pedra, cascalho ou seixo rolado, britados:

>> partículas limpas, duras, resistentes, isentas de torrões de argila e substâncias nocivas, com textura rugosa;

>> características:

>> desgaste Los Angeles $\leq 40\%$ (admitindo valor maior se experiência anterior foi de desempenho satisfatório);

- índice de forma superior a 0,5;
- durabilidade: perda inferior a 12%;

Controle: ensaio de adesividade ao ligante asfáltico selecionado.

Outro exemplo são os requisitos do DAER ES-P 15/10 para tratamento superficial duplo:

– ensaio de abrasão Los Angeles (DAER/RS-EL 103/01) $\leq 30\%$;

– ensaio de sanidade (DAER/RS-EL 104/01) $\leq 10\%$;

– lamelaridade do agregado (DAER/RS-EL 108/01) $\leq 25\%$;

– porcentagem de partículas britadas (DAER/RS-EL 109/01) $\geq 90\%$.

Os agregados de tamanho único são denominados pelos diâmetros nominais mínimo e máximo, d e D, com uma indicação das tolerâncias quanto às frações menor que "d" e maior que "D". A utilização da relação d/D deverá observar os seguintes itens:

- a) "D" corresponde à abertura em mm da malha da peneira em que passa 90% do material;
- b) "d" corresponde à abertura em mm da malha da peneira em que passa 15% do material;
- c) a relação d/D deverá ser maior ou igual a 0,65.

Os valores de "d" e de "D" serão obtidos graficamente, para definir as granulometrias dos materiais selecionados.

No que concerne à forma, os agregados devem satisfazer às prescrições das especificações, e nenhuma correção é possível. Contudo, deve-se ter atenção quanto à forma dos grãos que não devem ser redondos nem achatados (ou plaquetas). Lembrar também que a utilização de agregados pré tratados ou pré envolvidos não é em geral aconselhável com as emulsões asfálticas.

Os cuidados com a estocagem dos agregados constituem um fator determinante de bom êxito dos tratamentos.

Tabela 6.8 – Faixas granulométricas para tratamento superficial duplo

Peneiras		% passando, em peso			Tolerâncias da faixa de projeto
Malha	mm	1ª camada	2ª camada		
		A	B	C	
1"	25,4	1-0	-	-	± 7
3/4"	19,0	90-100	-	-	± 7
1/2"	12,7	20-55	100	-	± 7
3/8"	9,5	0-15	85-100	100	± 7
Nº 4	4,8	0-5	10-30	85-100	± 5
Nº 10	2,0	-	0-10	10-40	± 5
Nº 200	0,075	0-2	0-2	0-2	± 2

Fonte: DNIT 147/2012.

6.3 Microrrevestimento asfáltico a frio

Microrrevestimento asfáltico a frio com emulsão modificada por polímero consiste na associação de agregado, material de enchimento (fíler), emulsão asfáltica modificada por polímero do tipo SBS, água, aditivos, se necessário, com consistência fluida, uniformemente espalhada sobre uma superfície previamente preparada. O microrrevestimento asfáltico a frio com emulsão modificada por polímero pode ser empregado como camada selante, impermeabilizante, regularizadora e rejuvenescedora ou como camada antiderrapante de pavimentos (DNIT 035/2005).

A mistura de agregados a ser usada no microrrevestimento deve conter agregados médios, miúdos ou pó de pedra, ou a mistura de ambos, provenientes da britagem de rochas sãs, e devem apresentar partículas individuais resistentes, livres de torrões de argila e outras substâncias nocivas.

Devem ser atendidos os seguintes requisitos:

- a) o material que deu origem ao agregado miúdo deve apresentar:
 - desgaste Los Angeles igual ou inferior a 40%;
 - perda inferior a 12% quando submetido à avaliação da durabilidade com sulfato de sódio, em cinco ciclos.
- b) o equivalente de areia do agregado miúdo, deve ser igual ou superior a 60%;
- c) material de enchimento – fíler: deve ser de natureza mineral finamente dividida, tal como cimento Portland, cal hidratada calcítica, pós calcários, cinzas volantes etc. Na aplicação, o fíler deve estar seco e isento de grumos.

Em algumas especificações de microrrevestimento é indicado o ensaio de azul de metileno para testar a presença de argila no material de enchimento ou no filer.

A composição da mistura deve satisfazer os requisitos apresentados na tabela 6.9, com as respectivas tolerâncias no que diz respeito à granulometria.

O projeto da dosagem de mistura deve atender aos seguintes requisitos:

- o tamanho máximo do agregado da faixa adotada deve ser inferior a 2/3 da espessura da camada compactada;
- a fração retida entre duas peneiras consecutivas, exceto as duas de maior malha de cada faixa, não deve ser inferior a 4% do total;
- a faixa de trabalho, definida a partir da curva granulométrica de projeto, deve obedecer à tolerância indicada para cada peneira, porém, respeitando os limites da faixa granulométrica adotada;
- as taxas de aplicação de agregados e ligante asfáltico devem ser definidos no projeto de dosagem. Geralmente, o consumo necessário encontra-se nos intervalos estabelecidos na tabela 6.9.

Diariamente deve-se inspecionar a britagem e os depósitos dos agregados, com o intuito de garantir que eles estejam limpos, isentos de pó e de outras contaminações prejudiciais.

Tabela 6.9 – Faixas granulométricas para microrrevestimento asfáltico a frio

Peneira de malha quadrada		Designação			Tolerâncias
		I	II	III	
ASTM	mm	% em massa passando			
1/2"	12,5	-	-	100	-
3/8"	9,5	-	100	85-100	± 7
Nº 4	4,75	90-100	70-90	60-87	± 5
Nº 8	2,36	65-90	45-70	40-60	± 5
Nº 16	1,18	45-70	28-50	28-45	± 5
Nº 30	0,60	30-50	19-34	19-34	-
Nº 50	0,30	18-30	12-25	14-25	± 3
Nº 100	0,15	10-21	7-18	8-17	-
Nº 200	0,075	5-15	5-15	4-8	± 2
Asfalto residual, % em massa de agregado seco		6,5-9,5	6,0-8,5	5,0-8,0	-
Filer, % em massa de agregado seco		0-3	0-3	0-2	-
Taxa de aplicação da mistura, kg/m ²		6-11	8-16	15-30	-
Espessura (mm)		4-15	6-20	10-30	-

Fonte: DNIT 035/2005 ES.

7. MÉTODOS DE COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A graduação do esqueleto mineral é uma das características que mais influencia na determinação de como a mistura asfáltica funcionará compondo uma camada de pavimentação.

Nos concretos asfálticos, a graduação ajuda a determinar quase todas as propriedades importantes. A graduação que produz máxima interligação de partículas, densidade máxima da mistura, resistência máxima, volume de vazios desejável, volume de vazios no agregado mineral adequado e menor permeabilidade é a que é altamente desejável para as misturas asfálticas densas.

Os modelos desses arranjos nos esqueletos minerais obedecem a vários conceitos, alguns bastante amplos e com restrições e outros com estudos muito profundos e com certas garantias. Mas o grande problema que o segmento rodoviário encontra é a configuração das britagens, que atendem com maior frequência ao mercado da construção civil, e com isso o mercado de construção de pavimentos necessita se adequar a essas condições nem sempre favoráveis às misturas asfálticas.

Passa-se a definir alguns parâmetros que ajudam a formular o esqueleto mineral de uma mistura asfáltica.

7.1 Tamanho máximo do agregado

O tamanho máximo do agregado pode afetar o desempenho dos concretos asfálticos seja qual for a camada onde esteja inserido. A instabilidade da mistura pode resultar de tamanhos máximos excessivamente pequenos e a baixa trabalhabilidade e/ou segregação podem resultar de tamanhos máximos excessivamente grandes.

A norma ASTM C 125 define o tamanho máximo agregado de duas maneiras:

- >> **Tamanho máximo:** a menor peneira pela qual passam 100% das partículas da amostra de agregado. Já a metodologia Superpave define o tamanho máximo do agregado como uma peneira maior que o tamanho máximo nominal.
- >> **Tamanho máximo nominal:** a peneira maior que retém algumas das partículas do agregado, mas geralmente não mais que 10% em peso. A metodologia Superpave define o tamanho nominal máximo (TNM) do agregado como um tamanho de peneira maior que a primeira peneira que retém mais de 10% do material. Assim, é importante especificar se é o "tamanho máximo" ou o "tamanho máximo nominal" que está sendo referenciado.

A graduação tem um efeito abrangente no desempenho do material. Mas qual é a melhor graduação? A resposta poderá variar dependendo do material pétreo, características desejadas da mistura, carregamento, capacidade estrutural e de mistura.

Pode ser razoável acreditar, como primeiro critério, que a melhor graduação é aquela que produz a densidade máxima. Isso envolveria um arranjo onde partículas menores são envolvidas entre as partículas maiores, o que reduz o espaço vazio entre as partículas. Isso cria mais contato partícula a partícula, que em concreto asfáltico aumenta a estabilidade e reduz a infiltração de água. Mas não é só este aspecto que tem de ser observado numa definição de curva granulométrica para uma mistura asfáltica. Além do mais, é necessário ter espaço suficiente para conter o ligan-

te asfáltico e ainda sobrar vazios com ar, necessários para a acomodação das partículas com a passagem do tráfego sem promover o deslocamento de massa. Portanto, a definição da curva granulométrica de projeto é uma variável muito importante e deve atender a muitos critérios, que nem sempre caminham na "mesma direção".

7.2 Curva de máxima densidade

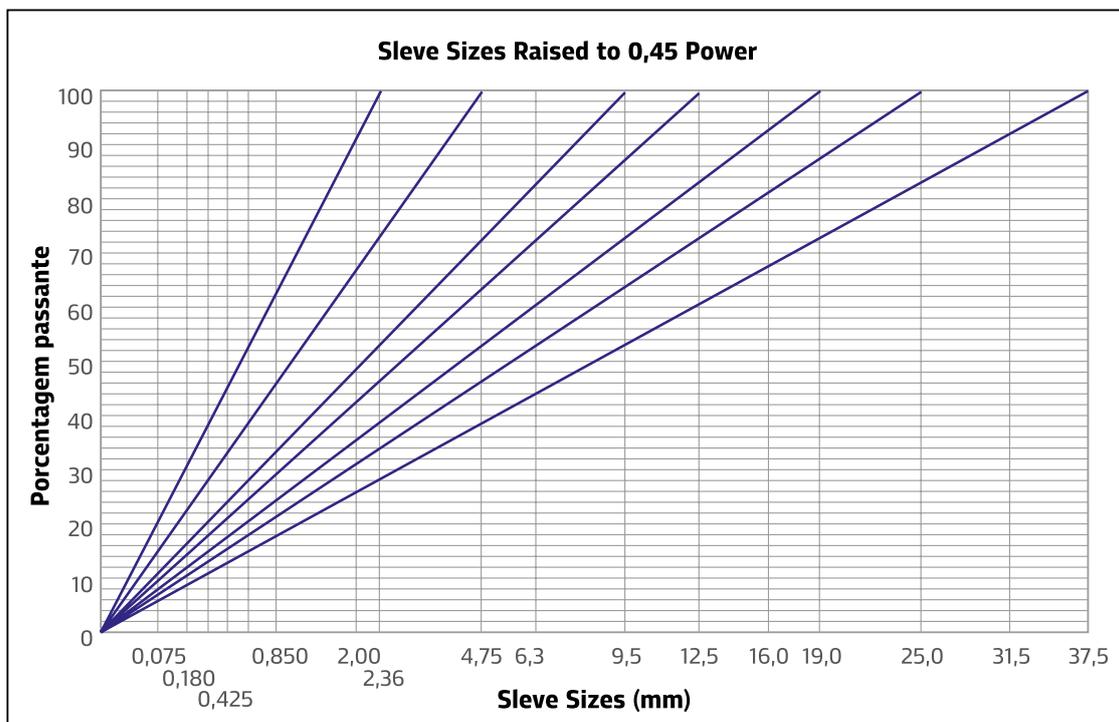
No início dos anos 1960, a FHWA introduziu um gráfico de graduação padrão usado na indústria de concretos asfálticos.

Este gráfico usa na abcissa, onde se definem os tamanhos dos agregados, a escala exponencial com $n = 0,45$ e é conveniente para determinar a linha de densidade máxima e a graduação de ajuste. Este gráfico é ligeiramente diferente de outros de graduação, porque usa o tamanho da peneira elevado a uma enésima potência (geralmente 0,45) como unidade do eixo x.

Assim, $n = 0,45$ aparece como uma linha diagonal reta (figura 7.1). A linha de densidade máxima aparece como uma linha reta de zero até o tamanho máximo agregado para a mistura que está sendo considerada (a localização exata dessa linha é discutível, mas os locais mostrados na figura 7.1 são geralmente aceitos).

Para ilustrar como as curvas de densidade máxima na **figura 7.1** são determinadas, a tabela 7.1 mostra os cálculos associados para um tamanho máximo de 19,0mm do agregado.

Figura 7.1 – Curvas de densidade máxima para o gráfico de graduação de potência de 0,45, cada curva é para um tamanho máximo de agregado diferente



Fonte: Acervo dos autores.

Tabela 7.1 – Cálculos para uma curva de gradação de potência de 0,45 usando o tamanho máximo agregado de 19,0mm (0,75 polegada)

Tamanho da partícula (mm)	% de passagem
19,00	$P = \left(\frac{19,00}{19,00}\right)^{0,45} = 1,000 (100,0\%)$
12,50	$P = \left(\frac{12,5}{19,00}\right)^{0,45} = 0,828 (82,8\%)$
9,50	$P = \left(\frac{9,5}{19,00}\right)^{0,45} = 0,732 (73,2\%)$
2,00	$P = \left(\frac{2,0}{19,00}\right)^{0,45} = 0,363 (36,3\%)$
0,30	$P = \left(\frac{0,30}{19,00}\right)^{0,45} = 0,155 (15,5\%)$
0,075	$P = \left(\frac{0,075}{19,00}\right)^{0,45} = 0,083 (8,3\%)$

Fonte: Elaborada pelos autores.

7.3 Métodos de combinação de agregados

7.3.1 Método gráfico (Rothfuchs)

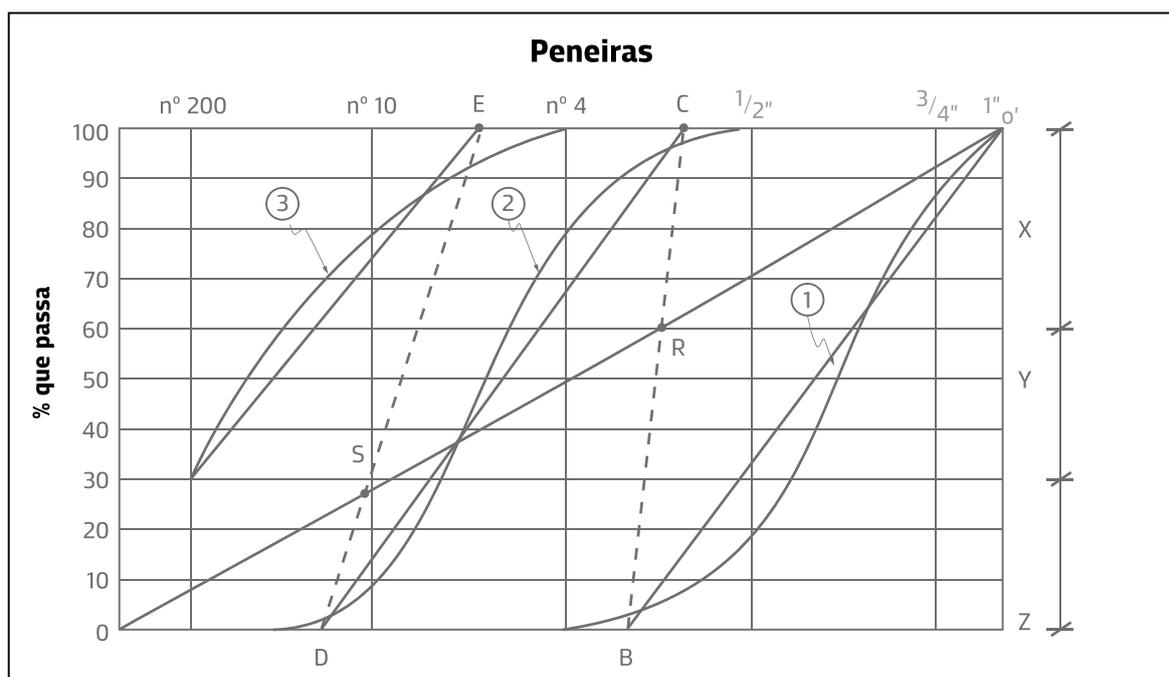
Esse método é bastante aproximado e, embora tradicional, não garante um acerto definitivo levando em conta as aproximações feitas. O uso mais corrente é para estabilização granulométrica de solos. Consiste em determinar a composição granulométrica de forma gráfica, traçando-se retas utilizando papel milimetrado. No eixo vertical do gráfico estão as porcentagens passantes de 0% a 100% e no eixo horizontal estão os diâmetros das peneiras. Plotam-se as granulometrias de cada material disponível para a combinação.

Traça-se diagonal uma OO' que representa uma curva média para a granulometria requerida para a mistura. A interseção das retas que vêm das pontas curvas partindo do eixo das peneiras com a diagonal OO' representarão a porcentagem passante de cada um dos materiais a serem combinados.

Resumidamente, os passos do método são (figura 7.2):

- >> traçam-se as curvas de distribuição granulométrica dos materiais disponíveis;
- >> são feitas retas sobre as curvas de modo que a área para cada um dos lados seja igual;
- >> ligam-se as retas com os pontos extremos das outras, CB e ED . Os pontos de interseção dessas retas com a diagonal OO' determinam a porcentagem de cada fração que deve entrar na mistura.

Figura 7.2 – Método Rothfuchs de combinação granulométrica



Fonte: Acervo dos autores.

Os valores dos pontos de interseção das retas (% passantes) são aplicados na equação 7.1, que determina as quantidades dos materiais de cada pilha de agregados para produzir um novo material combinado. Se os resultados atenderem às especificações, as quantidades de granulares determinadas pelo método podem ser utilizadas na dosagem da mistura

$$\#p_i = a_iX + b_iY + c_iZ \quad (7.1)$$

Os coeficientes a_i , b_i , c_i são as porcentagens passantes na peneira p_i e X , Y , Z são as porcentagens dos materiais 1, 2 e 3 ensaiados.

O método é um ponto de partida para quando não há as informações necessárias sobre os materiais, dando um certo "rumo" para o método das tentativas. Então esse método faz uma estimativa inicial das porcentagens de cada material, determinando uma faixa da granulometria dos agregados que irão compor a mistura.

7.3.2 Método das tentativas

O método das tentativas é interativo onde são feitas tentativas para determinar a porcentagem de cada material. Os valores iniciais das dosagens (X , Y e Z) dos materiais são escolhidos de acordo com a experiência do operador.

São traçadas sobre as curvas granulométricas, duas curvas limites (superior e inferior) que atendem às especificações normativas. Calcula-se a porcentagem que passa (a , b e c), por meio da equação 7.2, de acordo com as quantidades dos materiais (X , Y e Z).

$$\%P_i = a_iX + b_iX + c_iX \quad (7.2)$$

Esse método nem sempre proporciona a melhor composição, sendo muito empírico. Várias composições podem se enquadrar numa mesma faixa especificada, cabendo a um profissional experiente adotar a mais adequada composição. E a faixa normatizada de tamanhos dos granulares que atende às especificações, abrange um intervalo muito grande, estando, portanto, mais suscetível a erros.

O método é empírico e por ser baseado em tentativa e erro, é necessário predefinir as frações que compõem as misturas e as quantidades para começar o processo. Para isso, o responsável deve ter amplo conhecimento sobre a granulometria das frações, para que as que forem empregadas estejam dentro dos limites normativos.

Outra razão que torna o método falho é que não há controle no peneiramento das frações comercializadas no Brasil, fazendo com que haja partículas com o mesmo diâmetro em diferentes frações.

Apesar da metodologia não apresentar grande confiabilidade nos resultados, ainda é amplamente utilizada no Brasil. Isso se deve à comercialização de materiais pétreos produzidos sem grandes exigências e apresentando grande heterogeneidade em sua granulometria.

7.3.3 Método Bailey

Este método leva em conta o intertravamento dos agregados, prioriza construir um forte esqueleto mineral para a mistura. Relaciona os vazios no agregado mineral com os vazios na mistura, e o entrosamento entre os grãos é um dado de entrada para o cálculo da dosagem. Está normalizado pelo DNIT (xxx). O uso deste método de verificação da distribuição granulométrica também é indicado por Shell (2015), por exemplo.

A primeira experiência no Brasil de uso deste método de análise de uma curva granulométrica de projeto para concreto asfáltico ou SMA foi feita por Cunha (2004).

O método Bailey é baseado na distribuição granulométrica, o grau de intertravamento é determinado de modo a evitar deformações permanentes. A quantidade de ligante é calculada modificando as quantidades de agregados miúdos e graúdos e em consequência o vazio no agregado mineral (VAM).

Geralmente os agregados graúdos são classificados como o material retido na peneira 4,75mm e os granulares que passam determinam a quantidade de material fino.

Entretanto, o método Bailey classifica como agregado graúdo e fino frações diferentes em função do tamanho máximo nominal da mistura. O material de granulometria fina preenche os vazios formados pelos granulares graúdos.

Para classificar os agregados desta forma, utiliza-se a equação 7.3 para definir a peneira de controle primário (PCP), dada por:

$$\text{PCP} = \text{TMN} \times 0,22 \quad (7.3)$$

PCP – peneira de controle primário.

TMN – tamanho máximo de controle da mistura.

Em seguida se determina a peneira de controle secundário e outros critérios.

É necessário quantificar o volume de vazios contido na amostra, então determinam-se as massas específicas dos granulares graúdos e finos.

Para encontrar todas as massas específicas divide-se a massa de agregado pelo volume conhecido do recipiente. As equações 7.4 e 7.5 mostram como é calculada a massa específica e o volume de vazios.

$$\text{Massa específica: } m = (G - T)/V \quad (7.4)$$

Onde:

M = massa específica solta do agregado, (kg/m³);

G = massa do agregado somada à massa do recipiente, (kg);

T = massa do recipiente, (kg);

V = volume do recipiente, (m³).

$$\text{Volume de vazios: \% Vazios} = 100 \times ((S.W) - M)/S.W \quad (7.5)$$

M = massa específica solta do agregado gráúdo, (kg/m³);

S = densidade aparente do agregado, (kg/m³);

W = densidade da água, 998kg/m³.

As massas específicas que devem ser calculadas com a equação 7.4 são:

- >> Massa específica solta dos agregados gráúdos: preenche-se um recipiente com agregado gráúdo, cuidadosamente, sem compactação.
- >> Massa específica compactada dos agregados gráúdos: o material gráúdo é inserido no recipiente em três camadas, compactando-se cada uma com 25 golpes a aproximadamente 50mm do fundo, em torno da superfície da amostra. Divide-se essa massa pelo volume do recipiente.
- >> Massa específica compactada dos agregados finos: o material fino é inserido no recipiente em três camadas, compactando-se cada uma com 25 golpes a aproximadamente 50mm do fundo, em torno da amostra. Divide-se essa massa pelo volume do recipiente.

Utilizando a formulação descrita determina-se a massa específica solta dos agregados gráúdos, kg/m³, e com esse valor realiza-se o cálculo do volume de vazios nos agregados gráúdos.

Com a massa específica compactada dos agregados finos determina-se a quantidade de agregados finos para preencher os vazios do esqueleto mineral dos gráúdos.

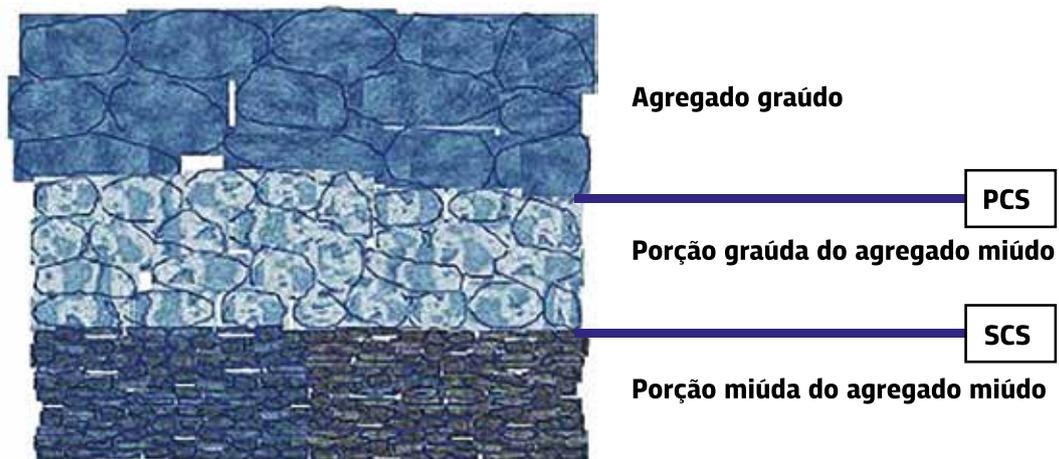
Encontrando-se as massas de agregados gráúdos e finos calculam-se as porcentagens desses materiais em relação ao peso total, e com um comparativo entre esses valores é possível analisar se o intertravamento está adequado.

Em misturas asfálticas densas com bom intertravamento entre os agregados gráúdos utiliza-se a massa específica do agregado gráúdo como sendo 95% a 100% da massa específica solta. Valores entre 90 e 95% não são adequados porque podem variar o grau de intertravamento. E para os granulares finos a massa específica escolhida deve ser menor do que 90% da massa específica solta.

Na tabela 7.2 mostram-se, como exemplo, os intervalos dos parâmetros a serem atendidos para que a mistura densa fique com um esqueleto mineral bem proporcionado. As figuras 7.3 a 7.6 mostram alguns dos conceitos aplicados nesse procedimento de ajuste da curva granulométrica de um concreto asfáltico, que constam do procedimento DNIT em fase de aprovação à época da edição desta publicação (DNIT xxx/2021).

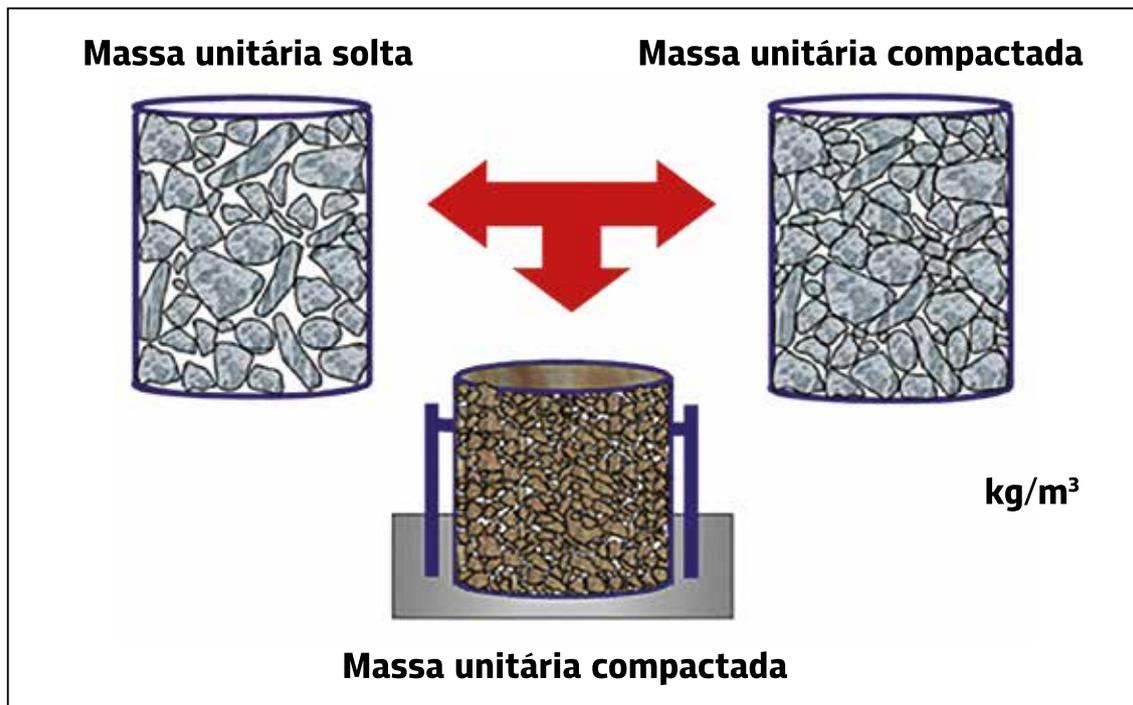
Detalhes deste método, que tem sido bastante utilizado no meio acadêmico brasileiro há vários anos, podem ser vistos no novo Procedimento do DNIT xxx/2021. Também se aplica para misturas tipo SMA.

Figura 7.3 – Visão geral das divisões de uma mistura de agregados de granulometria contínua pelo método Bailey



Fonte: DNIT/2021.

Figura 7.4 – Massa unitária e volume de vazios dos agregados



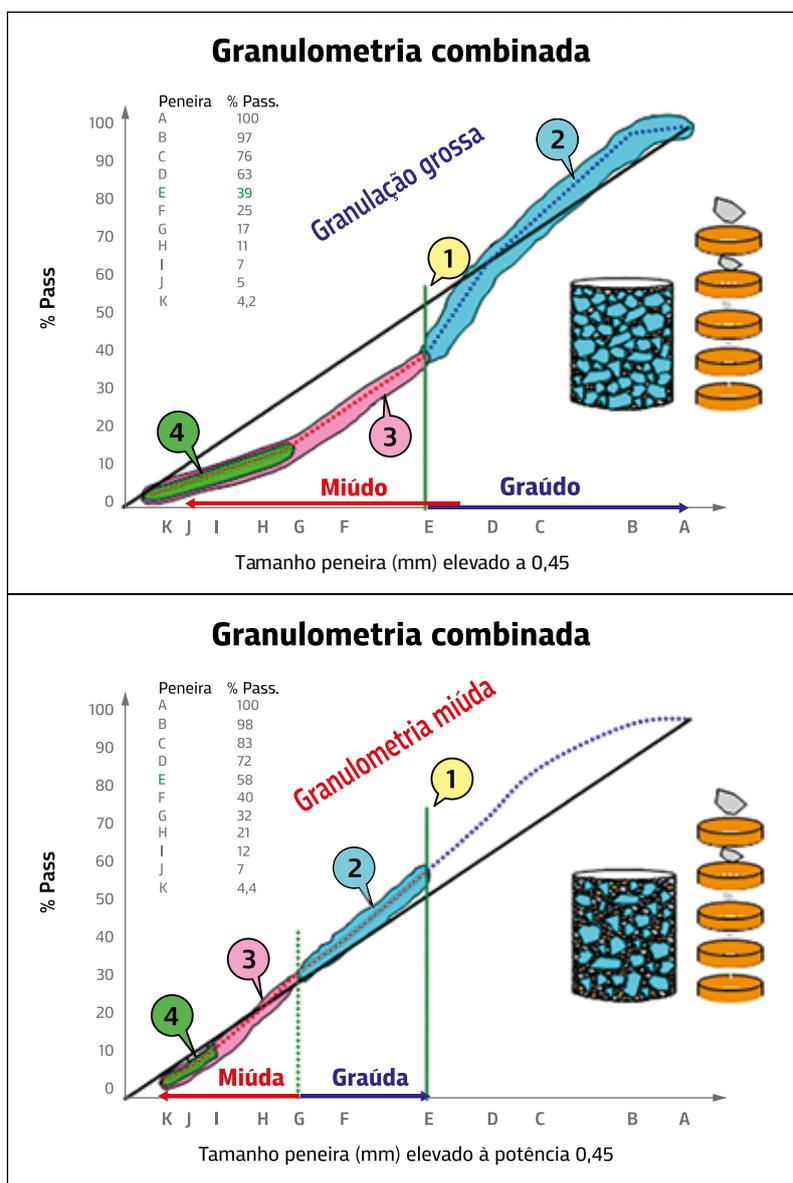
Fonte: DNIT/2021.

Tabela 7.2 – Limites das proporções dos agregados com comportamento graúdo

Parâmetros	Proporção CA	Proporção FAC	Proporção FAF
Tamanho máximo nominal (TMN), mm	37,5	0,80-0,95	0,35-0,50
	25,0	0,70-0,85	
	19,0	0,60-0,75	
	12,5	0,50-0,65	
	9,5	0,40-0,55	
	4,75	0,30-0,45	

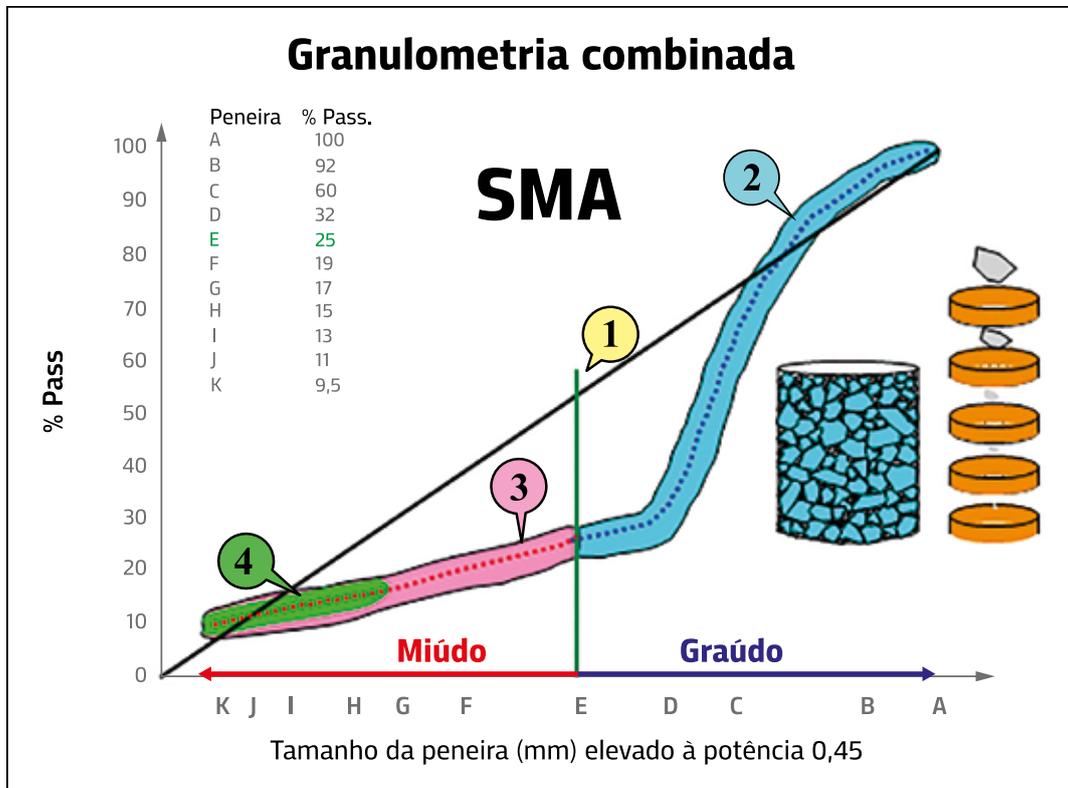
Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 7.5 – Exemplos de granulometria combinada dos agregados disponíveis que definem o tipo de concreto asfáltico final



Fonte: DNIT/2021.

Figura 7.6 – Exemplo de granulometria combinada dos agregados disponíveis que definem o tipo de SMA final



Fonte: DNIT/2021.

7.3.4 Método teórico ou método de Füller-Talbot

O desempenho das misturas asfálticas está relacionado com as características de sua distribuição granulométrica, a qual, se mal concebida, afeta prejudicialmente as propriedades funcionais e estruturais da camada do pavimento, provocando danos como a deformação permanente, fluência excessiva, exsudação, desagregação, e até mesmo a fadiga precoce.

Neste contexto, o método teórico, também denominado racional, utiliza a expressão de Füller-Talbot, para a seleção discretizada dos diâmetros de partículas, permitindo assim controlar com precisão a distribuição dos percentuais dos agregados, dispensando o uso de faixas granulométricas.

Esse método formula uma curva granulométrica bem definida, utilizando como base o maior e o menor diâmetro dos grãos que deverão compor a mistura. As peneiras intermediárias são definidas entre esses diâmetros.

O maior diâmetro é definido pela peneira com malha onde passam 100% dos grãos e o menor diâmetro pela malha que retém no máximo 10% de material. Os diferentes diâmetros proporcionam um melhor preenchimento dos vazios da mistura asfáltica é dada pela equação 7.6 a seguir:

$$\%p = a.(d/D)^n \quad (7.6)$$

Onde:

%p = porcentagem passante na peneira de diâmetro d (menor diâmetro);

a = constante igual a 100;

D = tamanho máximo da abertura que passa 100% (mm);

d = abertura de uma dada peneira (mm);

n = expoente.

O expoente n depende do tipo da curva que se pretende construir podendo ser de graduação:

densa: $0,35 < n < 0,55$;

aberta: $0,55 < n < 0,75$;

tipo macadame: $D = 2d$; $n = 1,0$.

A utilização de uma curva teórica possibilita a formulação de uma curva densa, com grãos mais proporcionados. O uso da curva também favorece a montagem de corpos de provas mais homogêneos, evitando diferentes granulometrias entre eles.

7.3.5 Método da faixa de agregados dominantes (FAD)

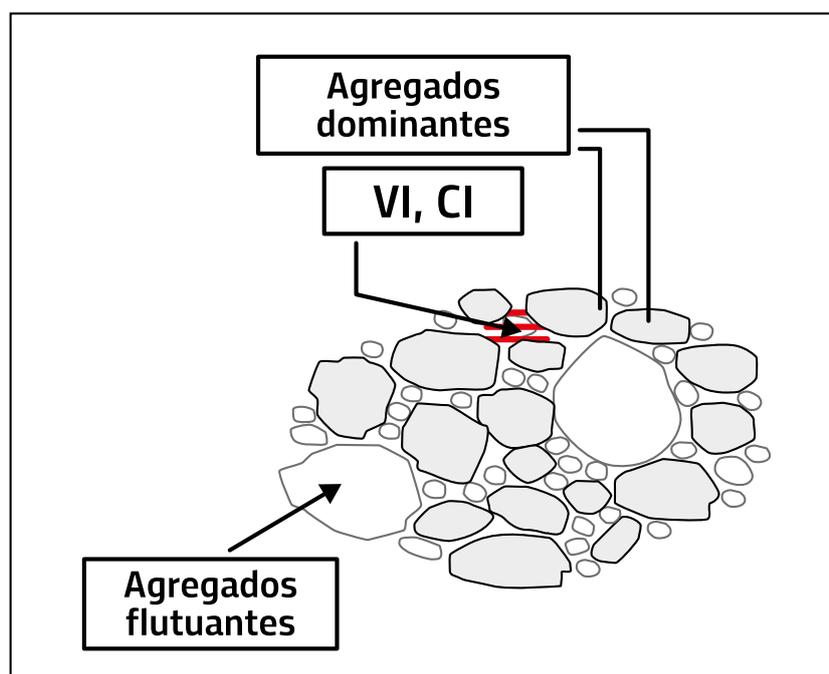
A faixa de agregados dominantes (FAD) caracteriza a curva granulométrica em função de um ou mais tamanhos de agregados que interagem entre si para a formação de um esqueleto pétreo resistente. FAD está diretamente relacionada à resistência à deformação permanente. A proposta inicial desse procedimento foi feita por Kim (2006).

A proposta dessa metodologia é avaliar a estrutura formada pelos agregados graúdos maiores que 1,18mm (peneira número 16).

Embora se saiba que outras propriedades dos agregados também são importantes para o desempenho da mistura asfáltica, esse método foca apenas na distribuição granulométrica.

Partículas de dimensões inferiores à FAD (também o ligante asfáltico) preenchem os espaços entre suas partículas. Esse material compõe o denominado volume intersticial (VI), do qual fazem parte os componentes intersticiais (CI), quais sejam, os agregados de dimensões inferiores à FAD, o ligante e os vazios com ar. A figura 7.7 ilustra os componentes da metodologia FAD.

Figura 7.7 – Constituintes da metodologia FAD



Fonte: Ferreira, 2017.

O VI está fortemente ligado ao trincamento por fadiga e à energia de ruptura da mistura asfáltica, e, além disso, mantém as partículas da FAD unidas, fornecendo adesão e resistência à tração. Por outro lado, as partículas maiores que a FAD simplesmente flutuam na matriz de agregados e acabam por não desempenhar um papel importante no esqueleto pétreo da mistura asfáltica.

A determinação da FAD de uma curva granulométrica é realizada por meio do diagrama de interação. Esse diagrama foi desenvolvido a partir de uma análise espacial teórica de distribuição das partículas que compunham uma determinada granulometria. Os resultados dessa análise indicaram que à medida que a proporção entre partículas maiores e menores (em duas peneiras contíguas) diminui, o espaçamento entre as partículas maiores aumenta.

Além disso, dados dois tamanhos de agregados em peneiras consecutivas, o espaçamento entre ambas aumenta rapidamente na medida em que a proporção relativa entre elas chegar a 70/30. Isso quer dizer que a proporção relativa entre quaisquer duas peneiras consecutivas deve estar entre 70 e 30%, resultando em boa interação entre as partículas.

Outro parâmetro importante desse método é a porosidade. A literatura estabelece que a porosidade de materiais granulares no estado solto é aproximadamente constante entre 45 e 50% e independe de sua distribuição granulométrica.

Isso implica que a porosidade de materiais granulares não deve ser superior a 50%, garantindo contato entre os grãos. Numa mistura asfáltica, o volume de vazios no agregado mineral (VAM) representa o volume disponível entre os agregados em uma mistura compactada, ou seja, o espaço ocupado por vazios e pelo ligante asfáltico. Tal conceito é análogo ao volume de vazios (Vv), em um solo. A partir do Vv pode-se determinar a porosidade do solo.

Assim, a FAD seria equivalente aos grãos de um solo, enquanto o VI, seria equivalente aos vazios entre esses grãos. Admite-se, portanto, que a porosidade das partículas granulares que compõe a FAD não deve ser superior a 50%.

A partir da consideração que uma mistura asfáltica possui uma quantidade efetiva de ligante e de vazios para uma dada granulometria, pode-se determinar a porosidade para uma única peneira, ou para peneiras contíguas, desde que elas interajam. A identificação da FAD inicia-se pela determinação do diagrama de interação, o qual indica quais peneiras estão interagindo. Uma vez identificados os agregados da FAD, a porosidade é calculada pela equação 7.7, cujos componentes estão indicados na figura 7.8:

$$= Vv(FAD)/VT(FAD) = VIC,ag + VAM/VTM - Vag > FAD \quad (7.7)$$

Onde:

η_{FAD} = porosidade da FAD (%);

$Vv(FAD)$ = volume de vazios dentro da FAD (%);

$VT(FAD)$ = volume total de agregado disponível para a FAD;

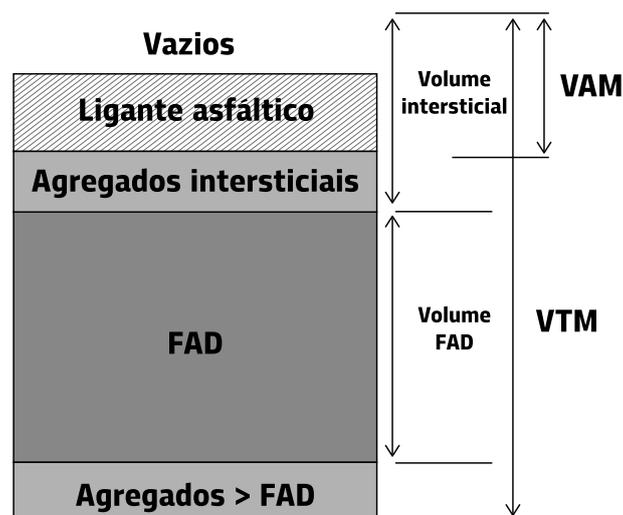
VIC,ag = volume de agregados intersticiais (menores do que a FAD);

VAM = volume de vazios no agregado mineral;

VTM = volume total da mistura;

$Vag > FAD$ = volume de agregados flutuantes (maiores do que a FAD).

Figura 7.8 – Componentes da mistura asfáltica para cálculo da porosidade da FAD



Fonte: Acervo dos autores.

A porosidade FAD entre 38 e 48% indica misturas asfálticas com um bom intertravamento em sua granulometria e uma boa resistência à deformação permanente. Adicionalmente, porosidades FAD entre 48 e 52% representam misturas com contato intergranular não adequado.

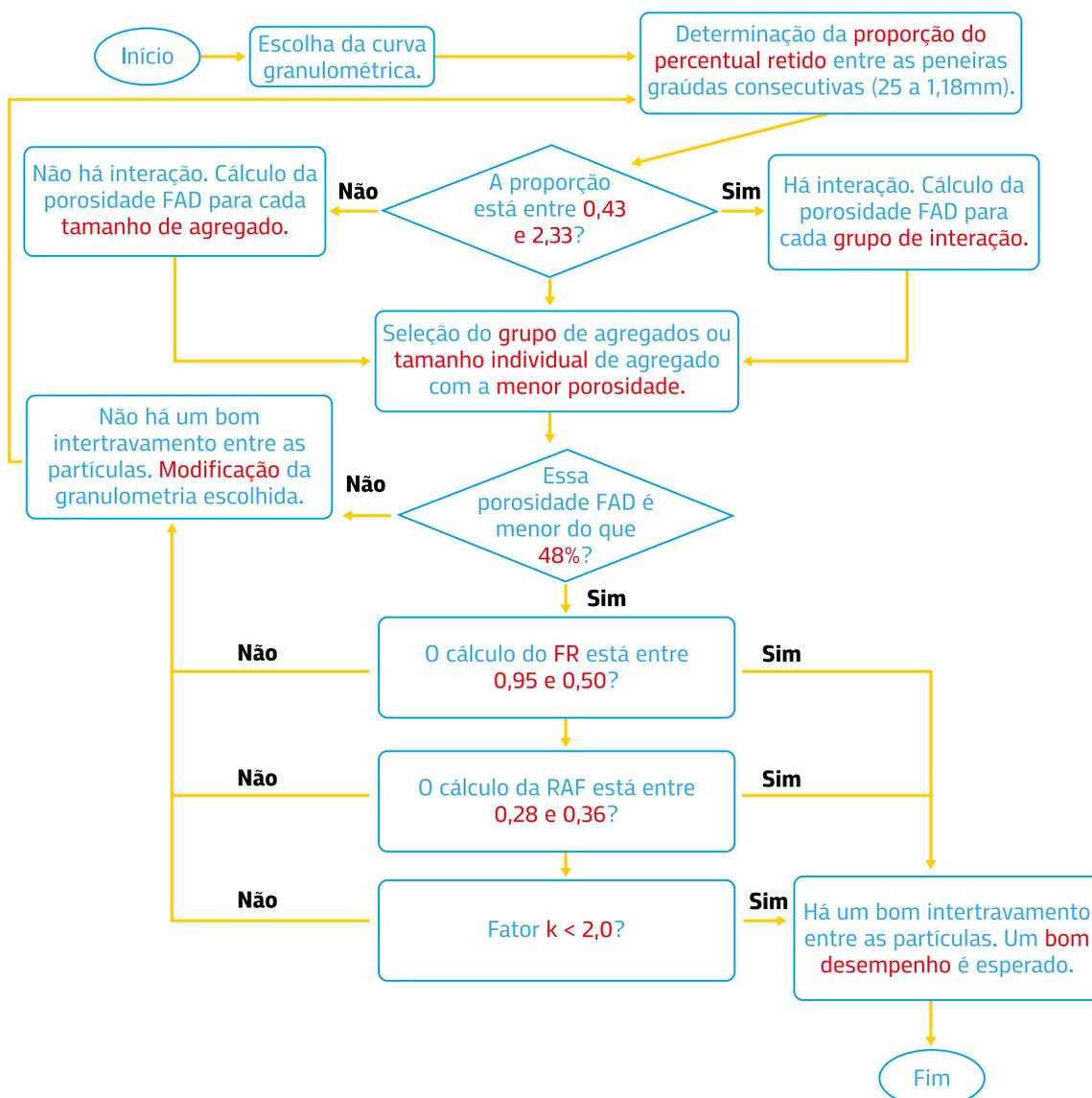
Na figura 7.9 mostra-se um fluxograma que descreve os passos deste método de verificação da granulometria de um concreto asfáltico.

O método FAD pode ajudar a eliminar misturas asfálticas que não terão um bom desempenho em campo, mesmo sem levar em consideração a qualidade dos demais componentes da mistura asfáltica, tais como os finos e o ligante asfáltico.

Bastos (2016) mostra que os resultados de deformação permanente em campo validaram os resultados de porosidade em laboratório. Portanto, o método FAD pode ser uma ferramenta de auxílio para uma dosagem asfáltica, visando aumentar a resistência aos esforços de carga impostas pelo tráfego.

Como exemplo, entre outros, Ferreira (2015), Ferreira et al. (2015, 2016), Barboza Junior (2017), Otaviano (2017) e Faccin (2018) aplicaram os princípios dos procedimentos Bailey e FAD para avaliar as misturas asfálticas estudadas por eles.

Figura 7.9 – Fluxograma do método FAD



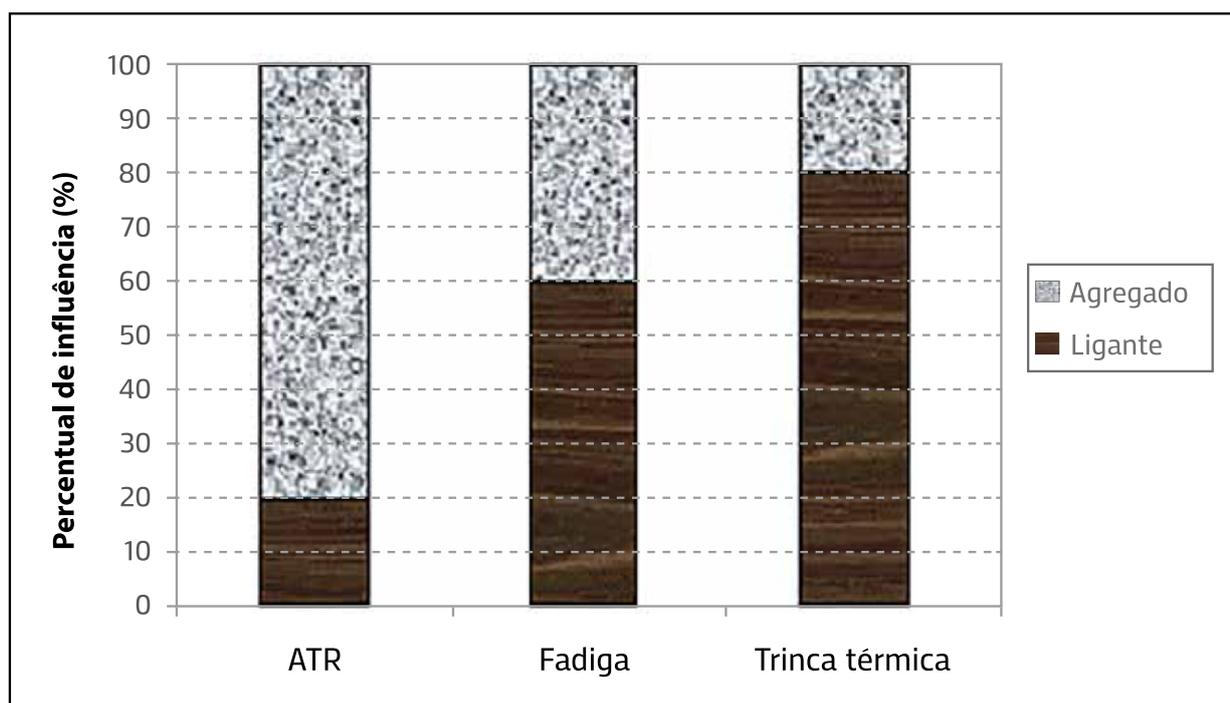
Fonte: Bastos, 2016.

8. EFEITO DAS CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS E SUA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA NO COMPORTAMENTO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A proporção de agregados em misturas asfálticas é de aproximadamente 93 a 97% em peso, e suas características físicas, químicas e mecânicas têm grande influência no desempenho das misturas asfálticas.

Como ilustração, a figura 8.1 mostra, de maneira genérica, a proporção da influência do agregado e do ligante em três dos principais defeitos que ocorrem nos revestimentos asfálticos: afundamento de trilha de roda, fadiga e trincas térmicas. Nesse gráfico, a relação entre efeito do agregado e do ligante é definida para cada mistura asfáltica, ou seja, quando se faz a dosagem de uma mistura, os agregados selecionados e proporcionados serão mais influentes na deformação permanente e menos na trinca térmica. Não é feita para comparar vários ligantes ou agregados, relativamente, é cada par. Nos itens seguintes, serão apresentados os aspectos dos agregados que mais influenciam esses danos, a trabalhabilidade e compactabilidade, o módulo de resiliência e o dano por umidade.

Figura 8.1 – Influência do agregado e do ligante no desempenho de uma mistura asfáltica



Fonte: FHWA, 2002.

A granulometria dos agregados, teor e tipo de filer, forma e textura dos agregados são características que afetam o comportamento mecânico das misturas asfálticas. Este capítulo ressalta as relações entre essas características e o desempenho da mistura nos pavimentos.

8.1 Efeito na trabalhabilidade e compactação

A mistura asfáltica deve poder ser colocada na pista e compactada com os compactadores existentes no mercado. Trabalhabilidade é geralmente relacionada à granulometria, ao tamanho nominal máximo, à forma e à textura dos agregados. O teor e a viscosidade do ligante também são importantes variáveis nas temperaturas de mistura e de compactação, que também influenciam na trabalhabilidade.

A habilidade de espalhar as misturas asfálticas na pista e de compactar é muito importante na pavimentação, e essa trabalhabilidade é a facilidade com que os revestimentos são construídos. Misturas graúdas dão mais trabalho ao pessoal da obra para compactar do que misturas finas. À medida que o tamanho nominal máximo (TNM) de um determinado agregado aumenta, a trabalhabilidade diminui. Por exemplo, mistura de TNM de 12,5mm tende a ser mais trabalhável e fácil de compactar do que uma mistura com TNM de 19mm. Mistura com granulometria total média mesmo de TNM de 19mm é mais fácil de compactar que mistura de granulometria graúda com TNM de 19mm. Misturas com alto teor de finos são mais fáceis de compactar porque o material miúdo permite melhor interação do agregado graúdo com o miúdo dentro da mistura asfáltica.

A forma e a angularidade dos agregados afetam a trabalhabilidade da mistura. Agregados cúbicos e angulares são menos trabalháveis, pois as arestas pontiagudas agem como obstáculo quando se usina a mistura. As extremidades pontiagudas dos agregados causam travamento, gerando maior atrito na mistura. Agregados mais arredondados permitem melhor interação. Areias de rio melhoram a trabalhabilidade, mas, por outro lado, podem causar deformação permanente.

Vários fatores contribuem para enrijecer as misturas, entre eles têm-se os seguintes:

- >> misturas graúdas;
- >> alguns asfaltos modificados e mais duros;
- >> forma dos agregados;
- >> menor teor de ligante;
- >> uso de temperaturas baixas (menores do que a ideal) no momento da colocação da mistura na pista.

A compactação reduz o teor de vazios, propicia o intertravamento dos agregados e reduz a espessura inicial da camada espalhada na pista. Este processo pode eventualmente melhorar a rigidez da mistura asfáltica e aumentar sua resistência ao dano por umidade. A compactação depende de vários fatores, incluindo a granulometria, tipo, textura e forma dos agregados e teor e tipo de ligante asfáltico. A introdução de ligantes modificados por polímero causou grande impacto na indústria de pavimentação. Embora esse tipo de ligante modificado em geral melhore as propriedades mecânicas das misturas asfálticas, para alguns modificadores há preocupação quanto à maior dificuldade de se compactar e, às vezes, necessidade de maiores temperaturas (como por exemplo no asfalto borracha). Uma forma de avaliar a compactabilidade de uma mistura é durante o emprego do compactador giratório. O procedimento de projeto da mistura que usa preparar

corpos de prova cilíndricos com o compactador giratório, permite medir a resistência à compactação em termos de variação da altura versus o número de giros, verificando a trabalhabilidade e a compactabilidade da mistura.

A trabalhabilidade e a compactabilidade podem ser avaliadas de várias maneiras:

- a) CDI e TDI obtidos na dosagem por meio da compactação giratória (Método DNIT 426/2020 – pavimentação – mistura asfáltica – determinação dos parâmetros CDI e TDI – instrução de ensaio), onde Compaction Densification Index (CDI) é o índice de densificação da compactação e Traffic Densification Index (TDI) é o índice de densificação do tráfego. Esses índices têm correlação com a resistência à deformação permanente da mistura (Nascimento, 2008);
- b) WI – índice de trabalhabilidade medido em compactador giratório GTM, medindo alturas de corpo de prova em diferentes números de giros, proposto por Cabrera (1994), sendo utilizado por pesquisadores na Indonésia. WI é calculado a partir da variação da porosidade dos corpos de prova com o número de giros. WI é o inverso do coeficiente de correlação linear da reta definida por porosidade x números de giros, multiplicado por 100. WI diminui com o aumento do teor de partículas achatadas. Eles verificaram que partículas achatadas devem ser evitadas em misturas asfálticas por reduzirem o intertravamento dos agregados e, por isso, limitaram sua presença em 25% nas normas da Indonésia (Siswosoebrotho, 2005). Além disso, estudos realizados nos EUA, mostram que WI menor que 6 é indicativo de dificuldades na compactação em campo;
- c) WEI e CEI são índices de energia de trabalhabilidade e índice de energia de compactabilidade, obtidos na compactação giratória propostos por Dessouky (2013), onde d é o diâmetro do corpo de prova, P é a pressão de compactação, h corresponde à altura durante a compactação e N é o número de giros. Os Gmm de 92% e 96% correspondem à densidade das misturas nos teores de vazios de 8 e 4%, respectivamente. Misturas asfálticas foram testadas quanto a índices de compactabilidade em três simuladores de carregamento de tráfego acelerado (ALF) no Alabama, Louisiana e Texas, conduzindo à recomendação de valores de WEI de no mínimo 4,5 e de CEI de no máximo 0,5. O índice de energia de compactabilidade CEI mostrou forte correlação com os valores de deformação permanente obtidos pelo simulador de tráfego Hamburg. Esses índices são calculados conforme as equações 8.1 e 8.2, a seguir:

$$WEI = \frac{\pi d^2 / 4 \times P \times (h_0 - h_{92\%})}{N_0 - N_{92}} \text{ (N. m)} \quad (8.1)$$

$$CEI = \frac{\pi d^2 / 4 \times P \times (h_{92\%} - h_{96\%})}{N_{92} - N_{96}} \text{ (N. m)} \quad (8.2)$$

Onde:

d = diâmetro do corpo de prova;

P = pressão de compactação;

N = número de giros;

h = altura do corpo de prova.

Sendo 92 e 96% Gmm, as densidades das misturas correspondentes a 8% e 4% de vazios respectivamente.

- a) A compactabilidade (CI) de misturas asfálticas em campo foi avaliada considerando o número de passadas dos rolos e a localização relativa de cada passada e no laboratório foi quantificada pelo coeficiente angular do percentual de teor de vazios com o número de giros, compactadas em compactador giratório, numa escala logarítmica para certo percentual de vazios (Masad, 2009). A compactabilidade do campo foi comparada com a de laboratório e mostrou que altos valores de coeficiente angular obtidos em laboratório necessitam de menos passadas dos rolos (CI) em campo para alcançar o mesmo teor de vazios. Na figura 8.2 mostra-se como foi executado este estudo e a faixa de valores de CI para compactação em campo.
- b) A relação entre índice de compactabilidade (WI) de Cabrera visto no item b e o índice de graduação (GI) é muito forte com o coeficiente de correlação de 0,9747. Esse índice GI foi proposto para se conhecer o efeito da granulometria graúda e miúda, sendo definido como a razão da área da curva retida e a área total. A equação 8.3 pode ser usada para prever WI (Setiawan, 2016):

$$IWI = 0,005 \times (G^2) - 0,2374 \times (GI) + 5,9197 \quad (8.3)$$

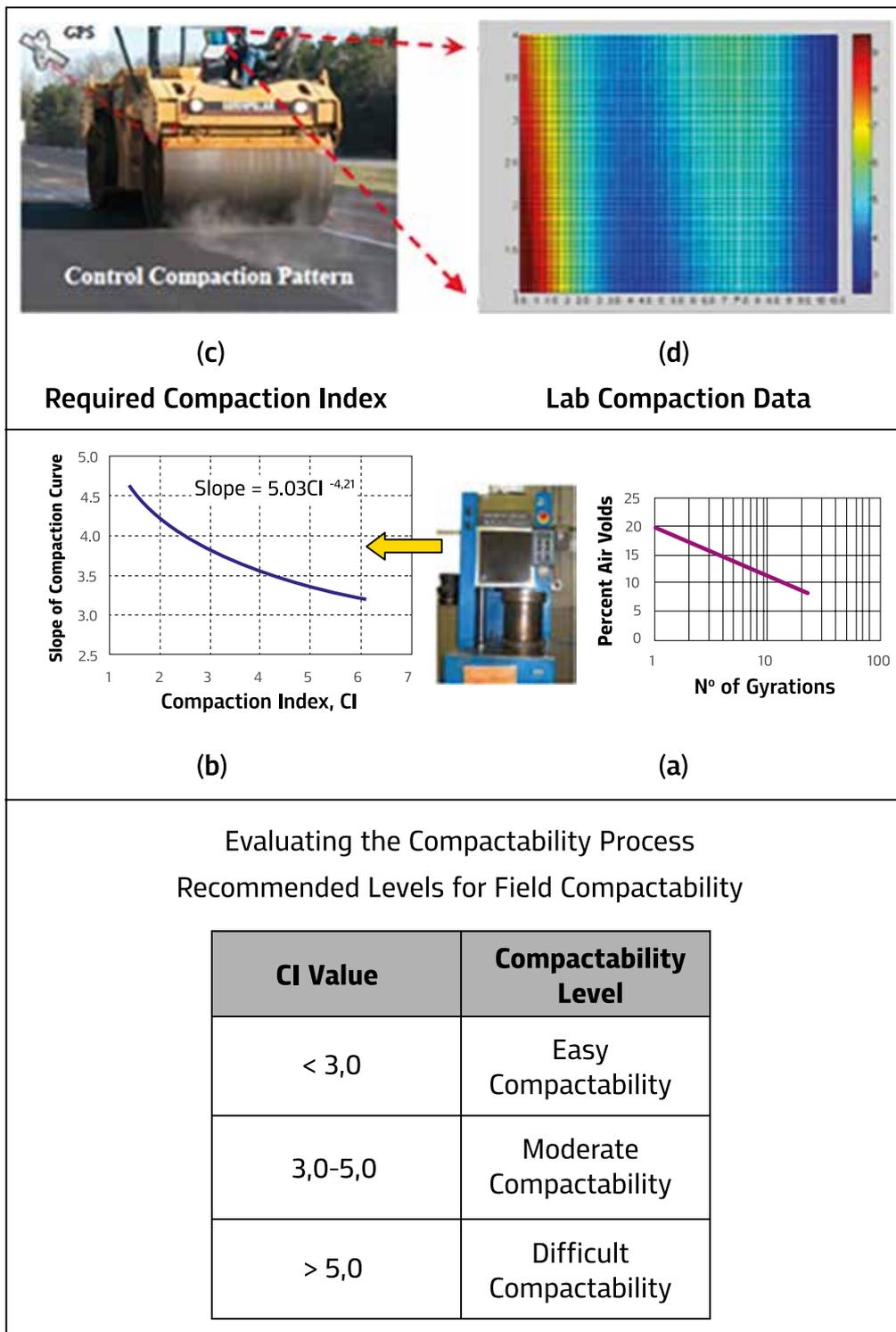
Onde GI é estimado por meio da equação 8.4, sendo função da área retida "a" da curva em mm², da área total "A" em mm² obtida pela equação 8.5 em função de Sr e T, onde Sr é o tamanho da peneira e T é o agregado acumulado retido (T₀ por exemplo, que corresponde a 10% passante cumulativo e se refere na curva de graduação ao agregado retido na peneira = 10mm). A figura 8.3 apresenta uma ilustração do cálculo das áreas.

$$GI = \left(\frac{a}{A}\right) \times 100 \quad (8.4)$$

$$a = \sum_{i=0}^n \left(\frac{Sr_i + Sr_{i+1}}{2}\right) \times (T_i - T_{i+1}) \quad (8.5)$$

Figura 8.2 – Processo de avaliação da compactabilidade e valores recomendados

para compactação em campo

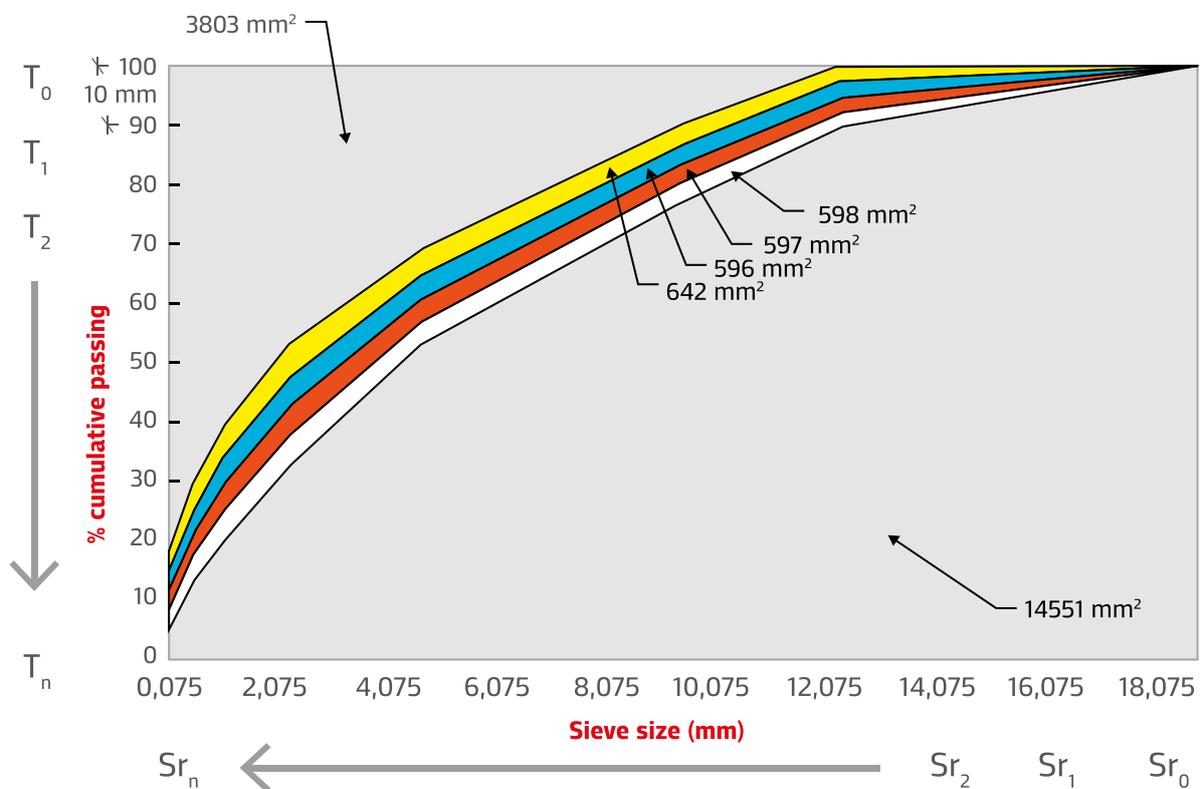


Fonte: Masad, 2009.

É muito importante ressaltar que a espessura da camada asfáltica a ser compactada deve ter uma relação com o tamanho máximo nominal da granulometria adotada: a espessura mínima da camada compactada deve ser de três (misturas finas) e quatro (misturas grossas) vezes o diâme-

tro nominal máximo do agregado. Por exemplo, o NCHRP 531 (2004) comenta que a densidade que pode ser obtida em condições normais de rolagem claramente se correlaciona com a relação entre a espessura (e) e o tamanho nominal máximo do agregado (TNM) da mistura. Para melhor compactação, recomenda-se que e/TNM seja pelo menos três para misturas de classificação fina e quatro para misturas de classificação grossa. Para SMA também a razão e/TNM deve ser pelo menos de quatro. Proporções menores poderiam ser usadas, mas a energia de compactação teria que aumentar muito para obter a densidade máxima. Na maioria dos casos uma relação de cinco (e/TNM) não resulta na necessidade de mais energia de compactação. No entanto, é preciso ponderar se a espessura da camada não fica muito grande a ponto de prejudicar a obtenção da densidade adequada em toda a camada.

Figura 8.3 – Área retida para cada granulometria



Fonte: Acervo dos autores.

8.2 Efeito na macrotextura, microtextura e no atrito

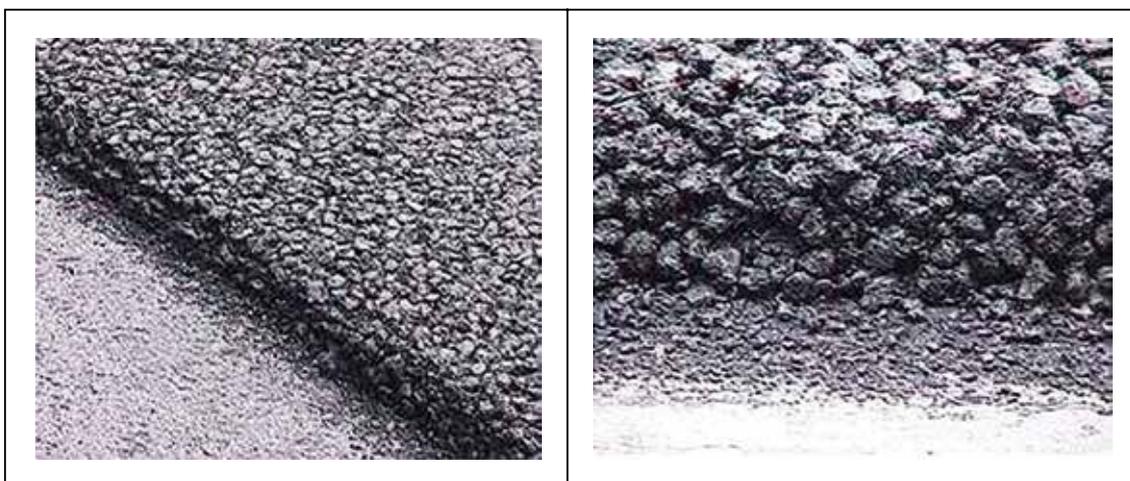
A macro e a microtextura da superfície de uma mistura asfáltica são intimamente relacionadas aos agregados que a compõe e definem o atrito pneu-pavimento, aspecto fundamental da segurança dos usuários. Macro e microtextura da mistura se relacionam com a angularidade, textura, resistência ao polimento e curva granulométrica dos agregados. Quanto mais angulosos, com textura rugosa e resistente ao polimento dado pelo tráfego, melhores serão as características de atrito da camada. Também as misturas de granulometria descontínuas, como o SMA e o GG, tendem a apresentar características mais favoráveis ao aumento do atrito devido à presença mais

acentuada de agregados graúdos. Na figura 8.4 mostra-se um exemplo de superfície rugosa de um SMA.

Em geral a medida da macro e da microtextura de uma superfície asfáltica é feita por dois ensaios simples, denominados de método da mancha de areia e método do pêndulo britânico, ilustrados na figura 8.5. Para recebimento de uma obra de revestimento asfáltico são estipulados valores aceitáveis desses dois ensaios, que estão ligados às características morfológicas dos agregados.

Como exemplo, cita-se Momm (1998) que avaliou o efeito da granulometria dos agregados na macro e microtextura superficial em misturas asfálticas, em laboratório e no campo.

Figura 8.4 – Exemplo de macrotextura de SMA: efeito da granulometria descontínua



Fonte: Acervo dos autores.

Figura 8.5 – Métodos da mancha de areia e do pêndulo britânico de avaliação de macro e microtextura de uma superfície asfáltica



Fonte: Acervo dos autores.

A resistência ao atrito depende da macro e microtextura da superfície do pavimento e pode mudar com o passar do tempo, especialmente se os agregados tiverem pouca resistência ao polimento. A resistência tipicamente aumenta 2 dias após a construção do pavimento, quando a rugosidade dos agregados fica exposta e depois diminui com o seu uso, devido ao polimento dos agregados. A variação sazonal, mudanças de temperatura e chuva alteram a relação de aderência pneu-pavimento, alterando a resistência ao atrito.

8.3 Efeito no dano por umidade induzida

O dano por umidade induzida (DUI) de uma mistura asfáltica é definido como a perda de adesividade na interface agregado-ligante devido à presença da água. A sensibilidade à umidade reflete-se principalmente na perda potencial de adesão entre o aglutinante e o agregado, comumente denominada "descolamento" (stripping, em inglês). Essa falta de adesão entre o ligante e o agregado pode ser causa de perda de resistência, de rigidez e de durabilidade da mistura asfáltica. O dano por umidade é uma das causas de vários defeitos, e, no entanto, é difícil de ser detectado no campo.

O concreto asfáltico pode ser considerado suscetível à umidade se a ligação agregado-ligante enfraquecer na presença da água, e, se esse enfraquecimento for grave o suficiente, pode resultar em descolamento do ligante da superfície do agregado (figura 8.6).

Figura 8.6 – Amostra de concreto asfáltico sem danos devido à umidade (esquerda) e com danos (direita), com inúmeros agregados descolados do ligante



Fonte: Acervo dos autores.

Só a presença da umidade não necessariamente resulta em descolamento ou desagregação, dependendo do tempo de saturação (tempo em que a água fica disponível) e do nível de tensão gerado pelo tráfego, entre outros fatores. Portanto, deve-se considerar esse aspecto na dosagem da mistura e no projeto do pavimento, prevendo drenagem e outros mecanismos para manter a água fora do revestimento rapidamente.

O dano por umidade pode ser tratado em duas dimensões: manter a umidade longe do pavimento e diminuir a sensibilidade da mistura aos efeitos da água. O revestimento asfáltico raramente é

completamente impermeável, e algum nível de umidade internamente pode ser inevitável, embora muitos vazios sejam não conectados.

Os fatores que afetam a sensibilidade à umidade incluem a natureza e as condições dos agregados, por exemplo, quanto à presença ou não de pó na superfície e textura superficial etc. e contribuem também o tipo e proporção do fíler e do cimento asfáltico.

Formas de melhorar a cobertura dos agregados pelo ligante asfáltico ajudam a minimizar o problema. A maioria dos fatores são controláveis pela seleção dos componentes e por ensaios na mistura final. Assim, a prevenção desse tipo de dano deve ser feita durante a fase de dosagem da mistura asfáltica, consistindo, em geral, em ensaiar corpos de prova compactados em laboratório e submetidos a vários tipos de condicionamento, comparando-se os resultados de um parâmetro mecânico obtido em corpos de prova sem condicionamento aos resultados dos corpos de prova condicionados.

Existem vários ensaios para identificar a suscetibilidade da mistura asfáltica aos danos causados pela umidade, desde os muito simples como o da norma DNER 078/94 de fervura, até os bem mais elaborados. No Brasil, assim como em vários países, há alguns anos, tem sido utilizado o ensaio conhecido como "Lottman modificado", normalizado como DNIT 180/2018, apoiado na AASTHO T 283, que mede a relação entre a resistência à tração indireta de corpos de prova condicionados por certos tratamentos na presença de água e os não submetidos a nenhum tratamento, conhecido como dano por umidade induzida (DUI).

A solução para minimizar esse efeito da umidade consiste em geral no uso de agentes melhoradores de adesividade, conhecidos popularmente como "dope". Na figura 8.7 mostra-se um agregado que tem deficiência de adesividade e o mesmo material com uso de um dope. A função desses aditivos é modificar a superfície do agregado e reduzir a tensão superficial entre o ligante asfáltico e o agregado, melhorando o recobrimento do agregado pelo CAP.

O tipo de rocha da qual provém o agregado, se ácida ou básica, tem influência determinante na suscetibilidade à umidade, sendo as rochas básicas menos sujeitas a este efeito visto que o ligante é ácido. O tipo de fíler também pode ter influência na suscetibilidade à umidade e uso da cal hidratada como fíler resulta em um desempenho melhor, em comparação com fileres provenientes de finos de rochas graníticas ou mesmo de calcário.

Figura 8.7 – O agregado à esquerda apresenta descolamento severo do ligante e o mesmo agregado à direita com 0,5% de agente melhorador de adesividade



Fonte: Acervo dos autores.

Agregados graúdos de rochas ácidas (definidas pela % de sílica) tais como granito, granodiorito, quartzo e pedregulhos de quartzo têm menor afinidade com o ligante do que os de rochas básicas (basalto, calcário etc.). A origem dos agregados tem grande influência na suscetibilidade à umidade.

Há muito é reconhecido, por muitos autores, o efeito benéfico da cal como agente anti-stripping mesmo quando comparada com alguns agentes comerciais melhoradores de adesividade. De saudosa memória, o engenheiro Dultevir de Melo, sempre foi um defensor e propagador do uso da cal hidratada para essa função.

Como exemplo, Boeira (2014) analisou diferentes tipos de agregados sem e com adição de 1,5% de cal (calcítica e dolomítica) quanto ao efeito na adesividade e na resistência mecânica. O comportamento no ensaio DUI variou com a formação geológica de cada agregado e o efeito da cal pode ser mínimo ou determinante. Para os materiais de origem granítica ou metamórfica, em geral com problemas de adesividade, a incorporação das cales mostrou aumento da resistência à tração re-tida, resolvendo o problema de adesividade. Os resultados estão indicados na tabela 8.1.

Barboza Júnior (2017) também avaliou o uso da cal e ligante convencional e modificado. Faccin (2018) avaliou 24 misturas asfálticas utilizadas em obras no Rio Grande do Sul, sob vários aspectos inclusive em relação ao DUI, com uso de cal ou dope.

Reduzir o teor de vazios ou aumentar o teor de ligante tem menos efeito nessa questão da suscetibilidade à umidade do que a escolha adequada dos agregados, de preferência os básicos quando possível, ou o uso de agente melhorador de adesividade.

O maior risco de descolamento ocorre quando a camada asfáltica fica saturada, e a saturação é mais provável onde o concreto asfáltico é permeável ou após o surgimento de fissuras e trincas. Em regiões tropicais, com muito volume de chuvas anuais, a suscetibilidade à umidade deve ser vista com cuidado.

Se uma camada mais permeável é colocada sobre uma camada menos permeável, tal como uma camada porosa de atrito sobre uma camada densa, com teor de asfalto maior, deve-se tomar cuidado especial para evitar que a água fique acumulada nesta camada permeável. A drenagem da superfície deve ser garantida para evitar a permanência da umidade por tempo superior ao necessário para o escoamento, evitando-se assim uma possível infiltração na camada inferior.

Tabela 8.1 – Resultados de dano por umidade induzida para diferentes agregados sem e com uso de dois tipos de cal

Misturas	Grupo I (MPa)	σ (%)	Cv (%)	Grupo II (MPa)	σ (%)	Cv (%)	RRT (%)
Mat. Bagé (REF)	0,74	0,074	9,90	1,09	0,015	1,41	68,24
Mat. Bagé (DOL)	0,86	0,059	6,82	1,11	0,048	4,35	77,35
Mat. Bagé (CALC)	0,81	0,033	4,10	1,08	0,034	3,18	75,53
Mat. Caçapava do Sul (REF)	0,62	0,056	9,10	0,89	0,043	4,84	69,55
Mat. Caçapava do Sul (DOL)	0,67	0,036	5,32	0,77	0,047	6,16	86,9
Mat. Caçapava do Sul (CALC)	0,63	0,036	5,65	0,81	0,066	8,16	77,62
Mat. Santo Ant. Patr. (REF)	0,87	0,033	3,80	0,89	0,047	5,34	98,12
Mat. Santo Ant. Patr. (DOL)	0,78	0,07	9,45	0,86	0,014	1,65	90,96
Mat. Santo Ant. Patr. (CALC)	0,86	0,043	4,86	0,96	0,034	3,52	89,28
Mat. Sarandi (REF)	0,88	0,037	4,16	0,93	0,106	11,4	95,07
Mat. Sarandi (DOL)	0,76	0,023	3,10	0,86	0,059	6,8	87,66
Mat. Sarandi (CALC)	0,81	0,042	5,26	0,94	0,042	4,46	85,56
Mat. Eldorado do Sul (REF)	0,51	0,022	4,36	0,87	0,066	7,56	58,59
Mat. Eldorado do Sul (DOL)	0,79	0,029	3,71	1,00	0,031	3,08	78,84
Mat. Eldorado do Sul (CALC)	0,57	0,008	1,34	0,79	0,016	2,01	72,78
Mat Itaara (REF)	0,29	0,044	15,15	0,60	0,073	12,3	48,37
Mat Itaara (DOL)	0,35	0,047	13,41	0,59	0,05	8,48	59,09
Mat Itaara (CALC)	0,23	0,078	33,86	0,51	0,078	15,8	44,53
Mat. Coronel Barros (REF)	0,72	0,039	5,34	0,75	0,008	11,1	96,27
Mat. Coronel Barros (DOL 1%)	0,5	0,032	6,41	0,69	0,045	6,49	72,2
Mat. Coronel Barros (DOL 2%)	0,55	0,064	11,52	0,68	0,086	12,56	80,93
Mat. Coronel Barros (CALC 1%)	0,67	0,102	15,39	0,66	0,087	13,2	100,77
Mat. Coronel Barros (CALC 2%)	0,71	0,061	8,62	0,73	0,105	14,32	97,06

Fonte: Boeira, 2014.

Os fatores críticos que influenciam a permeabilidade do concreto asfáltico são os vazios de ar, a granulometria dos agregados, o tamanho máximo nominal (TMN), a espessura do filme de asfalto e a trabalhabilidade e compactabilidade da mistura. Um teor de vazios acima de 7% aumenta a interconectividade dos vazios com ar e, em consequência, a permeabilidade. Um TMN maior, uma graduação graúda e um menor fíler de ligante podem levar ao aumento da permeabilidade no mesmo sentido que o teor de vazios. E obter vazios menor do que 7% em misturas muito graúdas pode ser difícil. A trabalhabilidade e a compactabilidade são função da forma do agregado, da curva granulométrica e da textura superficial dos agregados, e também do tipo de fíler e de asfalto. Obter o grau de compactação de projeto no campo é um fator importante para controlar a permeabilidade. Tomar cuidado nas juntas construtivas, particularmente longitudinais, evitando a segregação dos agregados graúdos e também a presença de material pouco compactado ajuda a evitar a entrada de água na mistura asfáltica.

A qualidade dos agregados graúdos, que podem influenciar a sensibilidade à umidade, inclui os agregados estarem limpos, a textura ser rugosa e a mineralogia ser adequada. Agregados contaminados com pó fino, ou particularmente argila na superfície, reduzem a adesividade entre o ligante e os agregados, e isto deve ser evitado de forma eficiente. A textura superficial dos agregados tem influência menor na efetividade da adesão agregado-ligante em relação às demais.

Em geral, alguns agregados têm mais afinidade com a água do que com o asfalto (hidrofílicos) e sofrem mais descolamento quando expostos à umidade. Outros agregados tendem a ter mais afinidade com o asfalto do que com a água (hidrofóbicos), e não sofrem o problema de descolamento. Além disso, a carga da superfície dos agregados quando em contato com a água afeta sua adesividade ao cimento asfáltico e sua suscetibilidade ao dano por umidade. Portanto, a química da superfície do agregado é um importante fator no descolamento.

O descolamento do ligante da superfície do agregado afeta a capacidade estrutural da camada asfáltica, o afundamento de trilha de roda (ATR), a corrugação, o desprendimento de agregados e o trincamento longitudinal ou por fadiga. A perda de ligação entre agregado-ligante, tipicamente, começa de baixo para cima numa camada de concreto asfáltico e quando chega à superfície, progride lateralmente com desprendimento (raveling) ou desagregação. É muito difícil reconhecer porque se manifesta na superfície combinado com outras formas de defeitos. É necessário tirar corpos de prova para identificar o descolamento como o problema inicial. Caso aconteça o descolamento, não há como corrigir este problema, sendo necessário remover a camada e recolocar uma nova mistura menos suscetível à umidade, além de corrigir problemas de drenagem subsuperficial. Portanto, é muito melhor testar a suscetibilidade à umidade durante a dosagem.

Os danos por umidade podem ocorrer quando a umidade permeia o mástique (fíler + ligante) enfraquecendo sua adesão e prejudicando sua resistência ao carregamento cíclico. Isto permite a desagregação e perda de agregados na superfície do revestimento, devido à perda de ligação entre o cimento asfáltico ou o mástique e os agregados mais grossos. A qualidade do mástique influencia o desempenho da mistura, assim como sua trabalhabilidade e facilidade de compactação. O efeito do fíler (material de enchimento) não é "só" volumétrico, visto que tem uma interação com o ligante tanto maior quanto mais fino, em função das suas características superficiais.

O concreto asfáltico é composto pelo mástique que envolve os agregados, e, assim, em geral, não se tem os agregados revestidos somente pelo ligante asfáltico. Por isso o tipo de filer pode alterar as propriedades das misturas. Muitos fileres minerais são substancialmente diferentes, tanto física quanto quimicamente, tais como pó de pedra, cal, cimento Portland, cinza volante e escória. Também tem relevância o tamanho dos grãos, e a sua concentração, além da superfície específica. Um parâmetro tradicional, denominado vazios Rigden, tenta exprimir parte dessas relações e influências diferentes nas propriedades físicas e mecânicas do concreto asfáltico. Quando o mástique tem sensibilidade à umidade, vai interferir nas características mecânicas globais da mistura.

A interação entre o filer mineral-asfalto pode ser investigada por ressonância magnética nuclear (RNM), calorimetria, energia de superfície, espectrometria de infravermelho e microscópio de força atômica, e pode ser relacionada com a resistência à tração, o módulo de resiliência e o dano por umidade induzida.

É comum se determinar a relação filer-asfalto como um parâmetro levado em conta na dosagem, considerando as porcentagens de cada um desses parâmetros em relação ao peso ou volume total da mistura. No entanto, ao se pensar nesta relação só no mástique, esta será maior do que na mistura completa.

O dano por umidade mede a redução na adesividade entre o asfalto e a superfície dos agregados presentes na mistura asfáltica. São quatro mecanismos principais para a adesividade ligante-agregado:

- a) **mecânica:** o ligante asfáltico colocado sobre a superfície rugosa de um agregado (com irregularidades e com poros) provoca uma ligação mecânica. A presença de umidade no agregado pode interferir na penetração do ligante no agregado e diminuir a ligação mecânica, aumentando a suscetibilidade ao deslocamento;
- b) **química:** uma reação química entre o asfalto e a superfície do agregado ocorre resultando em uma adesão química. Em geral, agregados ácidos não reagem fortemente com o ligante e essa ligação fraca pode não resistir à água;
- c) **tensão de adesão:** a tensão entre o asfalto e o agregado na linha de molhagem gerada quando uma gota se espalha sobre uma superfície, é geralmente menor que a tensão gerada entre a água e o agregado. Assim, se os três elementos estiverem em contato, a água tende a deslocar o ligante do agregado, o que pode levar ao descolamento. Esta tensão interfacial entre o ligante e o agregado varia com o tipo de ligante, o tipo de agregado e a rugosidade (textura) da superfície do agregado;
- d) **orientação molecular:** quando em contato com o agregado, as moléculas de asfalto tendem a se orientar em relação aos íons presentes na superfície do agregado, criando uma atração fraca. As moléculas de água são dipolares, e mais polares do que as moléculas do ligante, e podem satisfazer preferencialmente as demandas de energia da superfície do agregado. Assim, a ligação fraca do asfalto com a superfície do agregado é vencida e pode resultar no descolamento.

Outros autores comentam os fatores que influenciam a suscetibilidade à umidade, embora nenhum deles individualmente possa ser a causa única do descolamento:

- a) **características do ligante asfáltico:** a viscosidade é importante porque pode indicar concentrações mais altas de asfaltenos (grandes moléculas polares). As moléculas polares podem criar maior tensão de adesão e orientação molecular. Viscosidades mais baixas, que podem representar concentrações mais baixas de asfaltenos, são mais suscetíveis a descolamento. Componentes individuais no ligante asfáltico, como sulfóxidos, ácidos carboxílicos, fenóis e bases de nitrogênio também podem afetar o potencial de descolamento;
- b) **características dos agregados:** além das já comentadas, a presença de ferro, magnésio, cálcio e alumínio é considerada benéfica, enquanto o sódio e o potássio são considerados prejudiciais; porosidade dos grãos que, se for muito alta, absorve parte do ligante e diminui o filme de asfalto sobre o agregado contribuindo para o envelhecimento precoce e descolamento;
- c) **clima na construção:** a construção da camada em clima frio pode resultar em compactação insuficiente e deixar a mistura com alto teor de vazios e relativamente permeável facilitando a entrada da água. A construção em situação de alta umidade no ar ou chuva também pode carrear água para dentro da camada;
- d) **tráfego:** se houver água na camada asfáltica, o aumento da carga do tráfego pode afetar de duas maneiras: acúmulo de pressão nos poros e acúmulo de pressão na ligação agregado-ligante, expulsando o ligante; e lavagem hidráulica visto que a passagem das rodas move a água presente causando a remoção do ligante.

8.4 Efeito no módulo de resiliência, no módulo dinâmico e na resistência à tração

Os módulos de resiliência (MR) e dinâmicos (MD) são sensíveis à consistência do ligante, quanto mais duro for o ligante empregado na mistura, maior o módulo. Outra variável importante da mistura asfáltica que afeta os módulos é o teor de vazios. Quanto maior o teor de vazios, menor o módulo, de forma geral, no caso de má compactação da mistura asfáltica. Quanto à influência dos agregados e dos fileres empregados na mistura, a literatura consultada mostrou as seguintes conclusões:

- >> o teor de agregados achatados influencia o valor do módulo de resiliência. Quanto maior seu teor, menor o valor do módulo (Siswosoebrotho, 2005);
- >> a granulometria geral dos agregados parece ter pouco efeito nos valores dos módulos enquanto o teor de vazios afeta tanto a resistência à tração como o módulo resiliente (Elliot, 1991);
- >> o módulo de resiliência é influenciado pelo tipo e quantidade de filer (Leite e Motta, 2002). A cal hidratada na razão filer-betume de 1,5 tem efeito pronunciado no aumento de módulo, seguido pelo filer de cimento e em seguida pelo calcário (Diab, 2018);

- >> estudos de inteligência artificial, empregando parâmetros de forma de agregados e características do ligante, mostram que o ligante afeta mais os valores de módulo dinâmico (Singh, 2013);
- >> as variáveis que mais afetam o módulo são a penetração do ligante e a temperatura de mistura e compactação, segundo estudo estatístico efetuado por pesquisadores espanhóis. O emprego de agregados arredondados e ligantes moles acarreta redução da energia de atrito e reduz o módulo de resiliência. Diminuir a temperatura de usinagem e de compactação reduz o módulo de resiliência, propiciando redução pela metade quando se baixa a temperatura de 160 para 120°C. O uso de surfactantes também reduz o módulo de resiliência quando usinados à temperatura de mistura convencional. Todas as misturas aditivadas seguem a tendência de diminuir o módulo quando a temperatura de usinagem reduz, mas o declínio é menos acentuado. Nas misturas com surfactantes, o comportamento do módulo resiliente não depende da temperatura. Assim, misturas com o mesmo teor de vazios podem ter diferentes módulos. Acredita-se, portanto, que os surfactantes têm efeito na resistência estrutural da mistura (Prat, 2011);
- >> a adição de fresado e o uso de cinza volante em misturas asfálticas aumentam o módulo de resiliência da mistura final (Ali, 1996 e Colbert, 2012);
- >> o módulo de resiliência é influenciado pelo tipo de ligante e o de filer, e seu valor diminui com o aumento do teor de vazios (Tayebali, 1994).

Como exemplo, mostra-se a equação proposta por Motta (1998) para previsão do MR para misturas a quente a diferentes temperaturas, antes de se ter um banco de dados com amostras de mistura asfálticas não compactadas submetidas ao envelhecimento de curto prazo para simular o na usinagem. Mostra a influência dos agregados nos seus vários tamanhos. A equação foi obtida por meio de regressão linear para dados obtidos no laboratório da Coppe/UFRJ. A equação 8.6, para misturas a quente, usando ligantes convencionais, recém-compactadas, considerou 78 misturas e obteve coeficiente de determinação (R^2) de 0,74.

$$MR = 7568,92 - 39,82P + 527,56V_v + 71,91RBV - 243P_b + 112,63P_{\frac{3}{4}} - 189P_{\frac{3}{8}} + 136,71P_4 - 169,91P_{200} - 423,57T \quad (8.6)$$

Onde:

MR: módulo de resiliência (MPa);

P: penetração do ligante (25°C, 0,1mm);

V_v: volume de vazios (%);

RBV: relação betume-vazios (%);

P_b: teor de asfalto (%);

P_{3/4}: porcentagem de agregado passante na peneira 3/4", em relação ao agregado total;

P_{1/2}: porcentagem de agregado passante na peneira 1/2", em relação ao agregado total;

P_{3/8}: porcentagem de agregado passante na peneira 3/8", em relação ao agregado total;

P₄: porcentagem de agregado passante na peneira número 4, em relação ao agregado total;

P₂₀₀: porcentagem de agregado passante na peneira número 200, em relação ao agregado total;

T: temperatura de ensaio (°C).

Esta expressão, embora uma nota histórica, serve para ressaltar os parâmetros da mistura mais influentes no MR bem como cada um influi na tendência a aumentar ou diminuir o módulo de resiliência.

Recentemente, foi elaborada por Begonha (2019) uma equação de previsão por meio de regressões múltiplas lineares com auxílio do software Statistica para módulo de resiliência de misturas asfálticas empregando dados de diferentes dissertações brasileiras desde 2004. A equação é função da granulometria (empregando tamanhos de agregados de peneiras citadas na equação 1, as peneiras P1, P4, P40, P80), RBV, VAM, teor de vazios e teor de ligante, sendo observado que algumas misturas foram submetidas a envelhecimento antes da realização do ensaio de MR e outras não. Por isso, foi decidido acrescentar uma variável de envelhecimento (*Env*) no modelo. Essa variável apresentará valor unitário para misturas envelhecidas e valor nulo para as misturas não envelhecidas. Foram exploradas diversas configurações de equações, utilizando regressões logarítmicas e regressões múltiplas lineares usando todas as variáveis ou apenas parte delas. Para o modelo completo, o *R*² foi de 0,87.

A seguir são apresentadas as equações 8.7 e 8.8, correspondentes a um modelo completo e um simplificado (Begonha, 2019):

$$\begin{aligned} MR = & 171279,9 - 2414,0P_b - 2712,0V_v - 497,8RBV + \\ & 1295,0VAM - 1356,3P_1 + 168,0P_{\frac{3}{4}} - 13,7P_{\frac{1}{2}} - 69,0P_{\frac{3}{8}} - 51,5P_4 - \\ & 141,1P_{10} + 233,9P_{40} - 125P_{80} - 178,9P_{200} + 1189,9E_{nv} \end{aligned} \quad (8.7)$$

$$MR = 47011,5 - 2505,6P_b - 2090,8V_v - 490RBV + 1040,82VAM + 1571,6E_{nv} \quad (8.8)$$

Onde:

MR: módulo de resiliência (MPa);

V_v: volume de vazios (%);

RBV: relação betume-vazios (%);

VAM: vazios no agregado mineral (%);

P_b: teor de asfalto (%);

P₁: porcentagem de agregado passante na peneira número 1, em relação ao agregado total;

P_{3/4}: porcentagem de agregado passante na peneira 3/4", em relação ao agregado total;

P_{1/2}: porcentagem de agregado passante na peneira 1/2", em relação ao agregado total;

P_{3/8}: porcentagem de agregado passante na peneira 3/8", em relação ao agregado total;

P₄: porcentagem de agregado passante na peneira número 4, em relação ao agregado total;

P₁₀: porcentagem de agregado passante na peneira número 10, em relação ao agregado total;

P₄₀: porcentagem de agregado passante na peneira número 40, em relação ao agregado total;

P₈₀: porcentagem de agregado passante na peneira número 80, em relação ao agregado total;

P₂₀₀: porcentagem de agregado passante na peneira número 200, em relação ao agregado total;

Env: valores de "0" para amostras não envelhecidas e "1" para envelhecidas.

Como exemplo, mostram-se na figura 8.8 os resultados de módulo de resiliência obtidos de uma pesquisa realizada entre a Concessionária Nova Dutra e a Coppe, onde, com os mesmos agregados, mas com TNMs diferentes, foram moldados corpos de prova pelo equipamento Marshall e pelo giratório, no teor ótimo de um e outro, e variando-se o teor de ligante dentro da faixa de variação usualmente aceita nas obras. São visíveis as diferenças obtidas para o MR. Na figura 8.9 mostram-se os resultados de RT para as mesmas condições. Fritzen et al. (2008) também mostram resultados comparativos de módulo de resiliência de misturas asfálticas para várias condições.

Na tabela 8.2 mostram-se resultados de módulo de resiliência (MR) e resistência à tração (RT) de misturas asfálticas preparadas com distintos fileres apresentados por Motta e Leite (2000). Nessa época, ainda não se fazia o envelhecimento prévio das misturas antes da compactação, e se utilizavam ligantes com classificação por penetração e por viscosidade. Mas, em termos relativos, vê-se a influência do filer e sua proporção em relação ao teor de ligante no MR e RT.

Barra (2005), Gouveia (2006), Pazos (2015), Almeida Jr (2016), Barroso (2018), entre outros, avaliaram a influência de propriedades do agregado no comportamento mecânico das misturas asfálticas.

Na tabela 8.3 mostram-se resultados de módulo de resiliência e de resistência à tração obtidos por Boeira (2014) para uma mesma faixa granulométrica, mas variando o tipo de agregado (origem geológica, estado do Rio Grande do Sul), sem e com a presença de cal. Nota-se a influência desse fator nos valores de MR e RT.

Gouveia et al. (2004) mostram o efeito da aplicação do método Bailey na definição da curva granulométrica de misturas asfálticas com três diferentes agregados, nas propriedades volumétricas, módulo de resiliência, resistência à tração e deformação permanente. Foi observado grande potencial do método Bailey de seleção de agregados para compor um esqueleto mineral bem proporcionado para misturas asfálticas densas, de forma a conduzir a desempenho adequado quanto às características de VAM, teor de ligante, deformação permanente nas trilhas de roda e trincas por fadiga.

Vários autores listados nas referências também avaliaram os procedimentos Bailey e FAD como seleção de curva granulométrica, com sucesso.

Nascimento (2008) analisou em laboratório diversas misturas asfálticas, com agregados de uma mesma pedra, mas com TNMs (25; 19; 12,5; 9,5mm) e ligantes diferentes e compactação giratória e Marshall. Avaliou as curvas granulométricas pelo método Bailey. Adicionalmente também analisou outras misturas com agregados de uma segunda pedra com diferentes ligantes. Mostrou variação no módulo dinâmico com o TNM e com o esqueleto mineral.

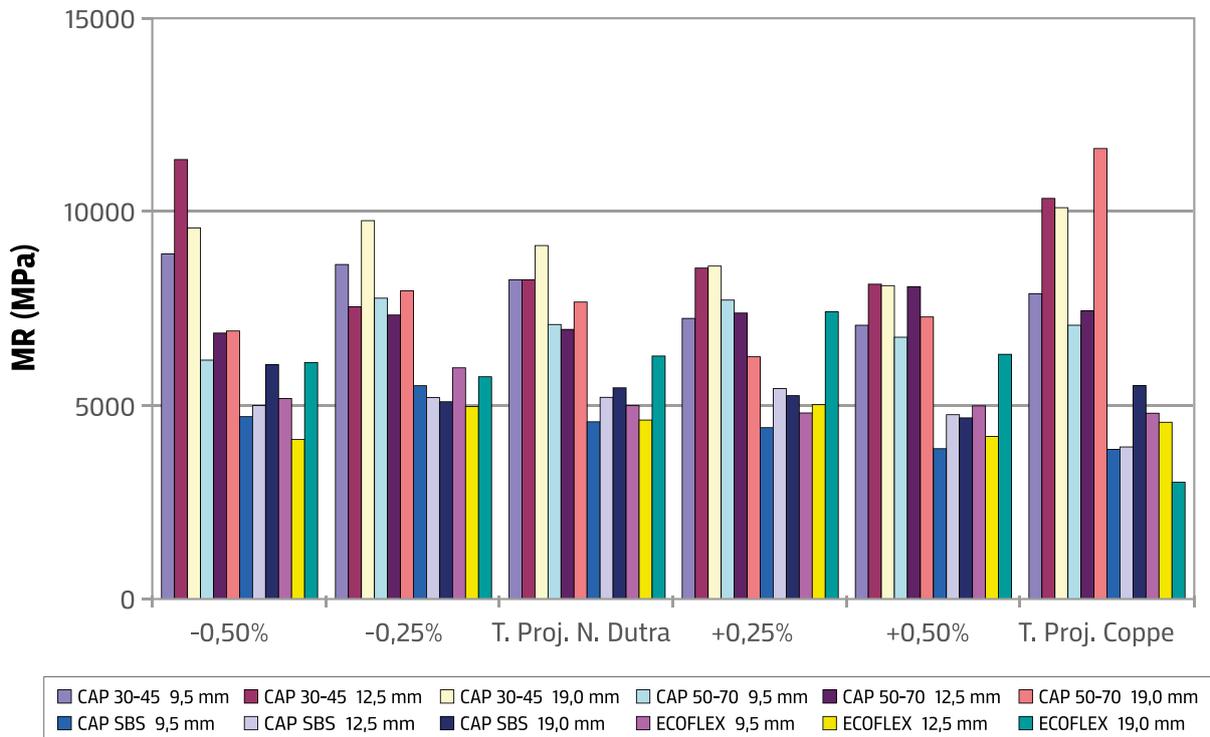
Possebon (2018) analisou diversas misturas asfálticas compostas com seis ligantes asfálticos e o mesmo tipo de agregado na faixa C do DNIT, produzidos em refinarias brasileiras e verificou o efeito desses diferentes CAPs nas propriedades de dosagem, no módulo de resiliência, no módulo complexo, no FN e na fadiga. Nos ensaios de rigidez não houve muita diferença, porém, nos ensaios de dano, o mesmo tipo de CAP, mas procedente de refinarias diferentes, teve influência.

Barra (2009) avaliou o efeito da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas seguindo métodos franceses de dosagem e de ensaios. Mostrou efeitos significativos tanto no módulo quanto na vida de fadiga.

Barroso (2018) avaliou concretos asfálticos típicos de Goiás, com dois tipos de agregados (micaxisto e granito), realizando ensaios de módulo de resiliência, módulo dinâmico, resistência à tração, FN e usando os métodos Bailey e FAD para analisar o esqueleto mineral. Foi feita dosagem Marshall e Superpave e a influência dos agregados foi percebida.

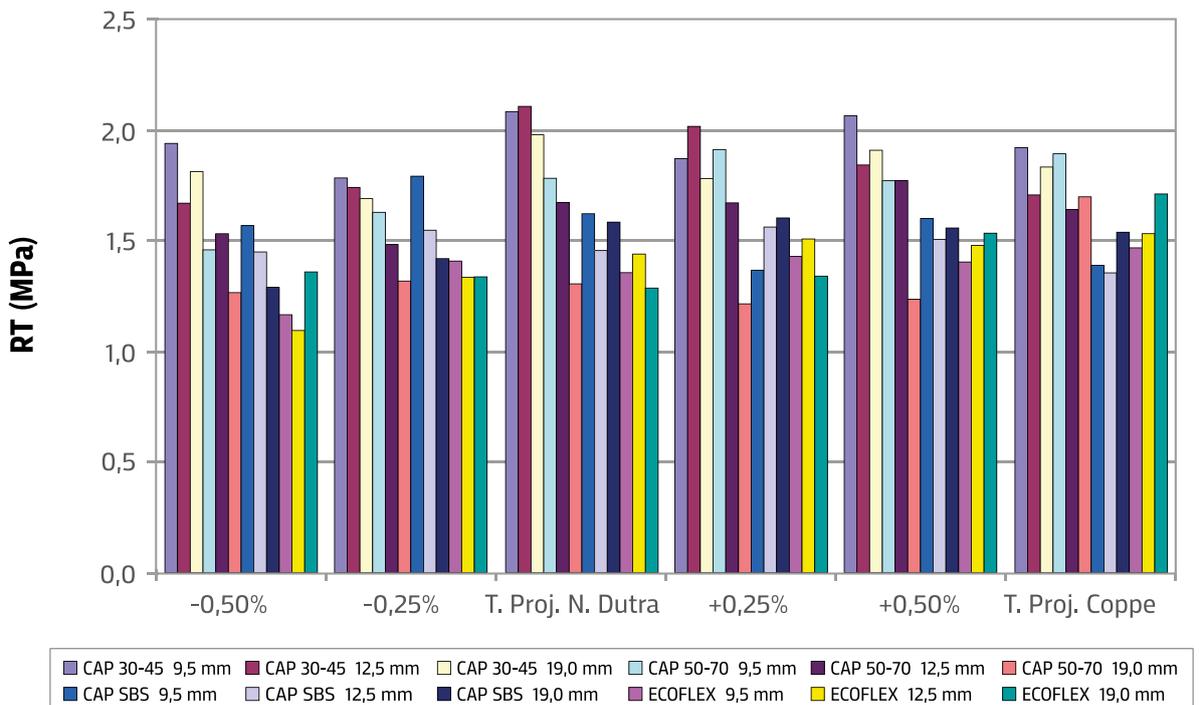
Brondani (2019) analisou 12 agregados diferentes por lâmina petrográfica e raios X e fez uma correlação dessas características com o DUI e, também, do efeito da umidade nos ensaios mecânicos de módulo de rigidez das misturas asfálticas. Após os ciclos de umidade induzida, houve aumento do ângulo de fase e diminuição do módulo dinâmico, especialmente nas misturas com o CAP 50-70.w

Figura 8.8 – Variação do MR de concreto asfáltico em função do TNM do agregado, tipo e teor de ligante



Fonte: Coppe/ND, 2010.

Figura 8.9 – Variação da RT de concreto asfáltico em função do TNM do agregado, tipo e teor de ligantes



Fonte: Coppe/ND, 2010.

Tabela 8.2 – Composição das misturas asfálticas e efeitos do tipo de filer nos ensaios mecânicos

Filer (F)	CAP	Teor de ligante, % p	Relação F/CAP	RBV	Teor de vazios, %	Estabilidade Marshall (N)	Resistência à tração σ^t (MPa)	Módulo resiliente, (MPa)
Calcário	20	5,4	1,2	75	4,03	7400	0,87	4300
Cimento	20	5,4	1,2	75	4,03	7540	0,7	3500
Pó de pedra	20	5,4	1,2	75	4,03	7190	0,81	3600
Calcário	40	5,9	1,1	76,7	4,07	6780	0,8	3100
Cimento	40	5,9	1,1	76,7	4,07	6250	0,64	3150
Pó de pedra	40	5,9	1,1	76,7	4,07	7690	0,75	2800
Calcário	85/100	5,6	1,16	78	3,64	6750	0,46	2300
Cimento	85/100	5,6	1,16	78	3,64	7520	0,49	1600
Pó de pedra	85/100	5,6	1,16	78	3,64	7530	0,49	2050
Cimento menor #400	40	5,9	1,1	76,7	4,07	-	0,82	3400
Cimento menor #400	20	5,4	1,2	75	4,03	-	0,91	4100

Fonte: Motta e Leite, 2000.

Tabela 8.3 – Valores de módulo de resiliência e de resistência à tração de misturas asfálticas com agregados de diferentes origens geológicas e mesma faixa granulométrica

Misturas	Média RT (MPa)	Média MR (MPa)	σ (MPa)	Cv (%)
Mat. Bagé (REF)	1,67	7878	293,77	3,82
Mat. Bagé (DOL)	1,73	8476	321,15	3,87
Mat. Bagé (CALC)	1,63	8194	297,23	3,67
Mat. Caçapava do Sul (REF)	1,38	8052	322,79	4,05
Mat. Caçapava do Sul (DOL)	1,61	8478	316,88	3,66
Mat. Caçapava do Sul (CALC)	1,57	7684	347,69	4,48
Mat. Santo Ant. Patr. (REF)	1,44	5345	194,71	3,59
Mat. Santo Ant. Patr. (DOL)	1,44	5945	244,35	4,09
Mat. Santo Ant. Patr. (CALC)	1,41	5703	235,73	4,17
Mat. Sarandi (REF)	1,55	5613	232,82	4,17
Mat. Sarandi (DOL)	1,49	5756	197,81	3,41
Mat. Sarandi (CALC)	1,48	5665	158,01	2,81
Mat. Eldorado do Sul (REF)	1,7	7644	299,34	3,89
Mat. Eldorado do Sul (DOL)	1,76	8229	376,69	4,55
Mat. Eldorado do Sul (CALC)	1,8	8231	209,37	2,57
Mat. Itaara (REF)	1,27	4788	152,98	3,28
Mat. Itaara (DOL)	1,43	5137	168,25	3,32
Mat. Itaara (CALC)	1,38	5387	149,11	2,75
Mat. Coronel Barros (REF)	1,3	3742	705,12	18,85
Mat. Coronel Barros (DOL 1%)	1,52	3828	992,49	25,93
Mat. Coronel Barros (DOL 2%)	1,46	3625	727,13	20,06
Mat. Coronel Barros (CALC 1%)	1,44	3872	462,32	11,94
Mat. Coronel Barros (CALC 2%)	1,35	3707	696,55	18,79

Fonte: Boeira, 2014.

8.5 Efeito na fadiga

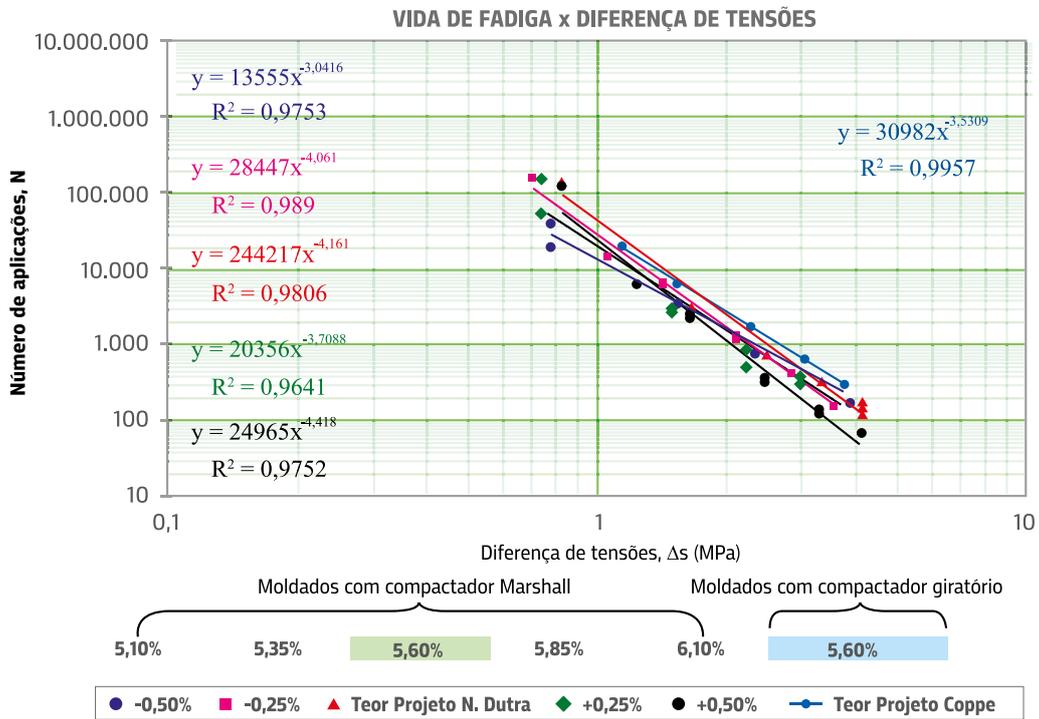
O trincamento por fadiga está ligado ao teor e à viscosidade do ligante. À medida que o teor de vazios do revestimento aumenta, seja por problemas de dosagem ou falha na compactação, a vida de fadiga é drasticamente encurtada. Do mesmo modo, o revestimento contendo ligante com baixa resistência ao envelhecimento, e que envelhece e enrijece, tem a resistência à fadiga reduzida. A estrutura do pavimento influencia bastante na fadiga do revestimento tendo em vista que contribui para aumento ou diminuição da deformação de tração que o revestimento asfáltico está submetido. Espessuras e rigidezes das camadas do pavimento, bem como a característica de suporte do subleito também tem importância na determinação da vida de fadiga de forma a prevenir trincas associadas ao carregamento. Misturas espessas e revestimentos com bom suporte não devem trincar precocemente sob carregamento. A revisão bibliográfica mostrou os seguintes efeitos dos agregados na fadiga de misturas asfálticas:

- as curvas de fadiga indicam por meio da mecânica do contínuo que quanto maior a razão filer-betume, menor a resistência à fadiga (Vale, 2016);
- o tamanho do filer também influencia a resistência à fadiga, sendo que a cal hidratada de tamanho nanométrico melhora mais a vida de fadiga do que a cal hidratada regular (Das, 2018);
- a vida de fadiga de misturas densas contínuas é maior que de misturas SMA de mesmo tamanho nominal máximo, resultante da diferença de granulometria das duas misturas. Misturas miúdas têm melhor desempenho à fadiga do que misturas com graduação graúda, causada por sua natureza mais densa. O efeito da graduação graúda e miúda da granulometria dos agregados é mais importante que o teor de ligante na vida de fadiga de misturas asfálticas (Nejad, 2010);
- a areia britada quando incorporada na mistura asfáltica melhora a vida de fadiga. Este efeito pode ser devido às propriedades da areia britada como angularidade, textura da superfície, resistência ao cisalhamento, distribuição e tamanho de partícula e teor de alumina e hematita no caso da areia estudada (Yasreen, 2011).

Para as mesmas misturas asfálticas indicadas nas figuras 8.8 e 8.9, mostram-se nas figuras 8.10 a 8.12 as curvas de fadiga para as mesmas condições de moldagem.

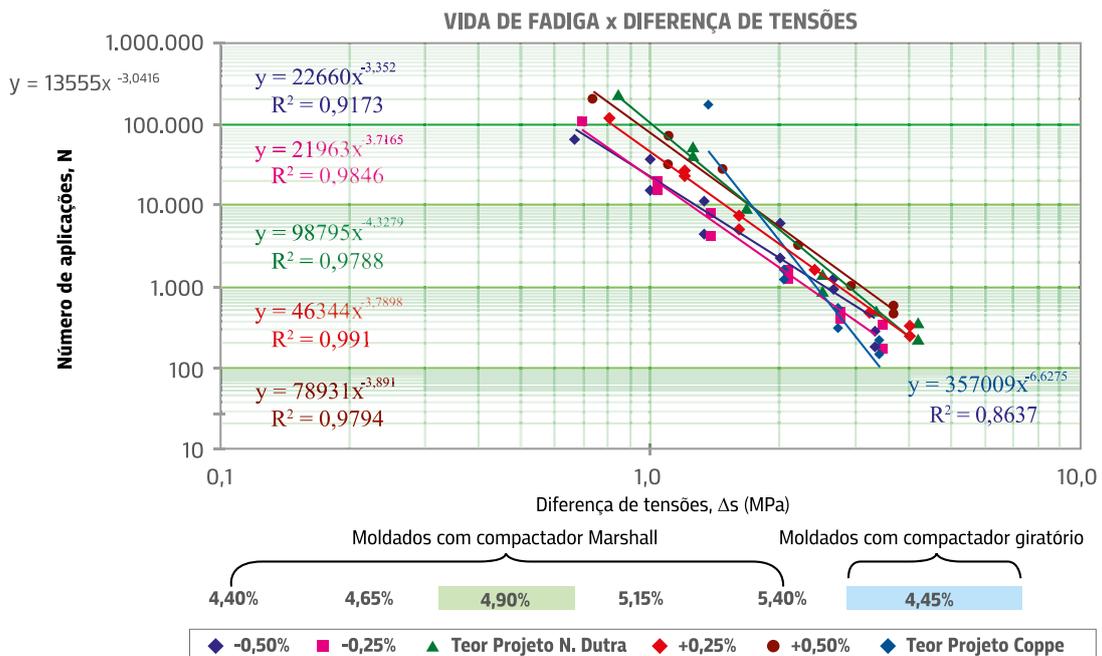
Resultados de efeito na fadiga podem ser vistos em Pinto (1991), Otto (2004), Barra (2009), Colpo (2014), Rossato (2015), Schuster (2018), entre outros autores.

Figura 8.10 – Curvas de fadiga de misturas com CAP 30-45 e faixa granulométrica 9,5mm



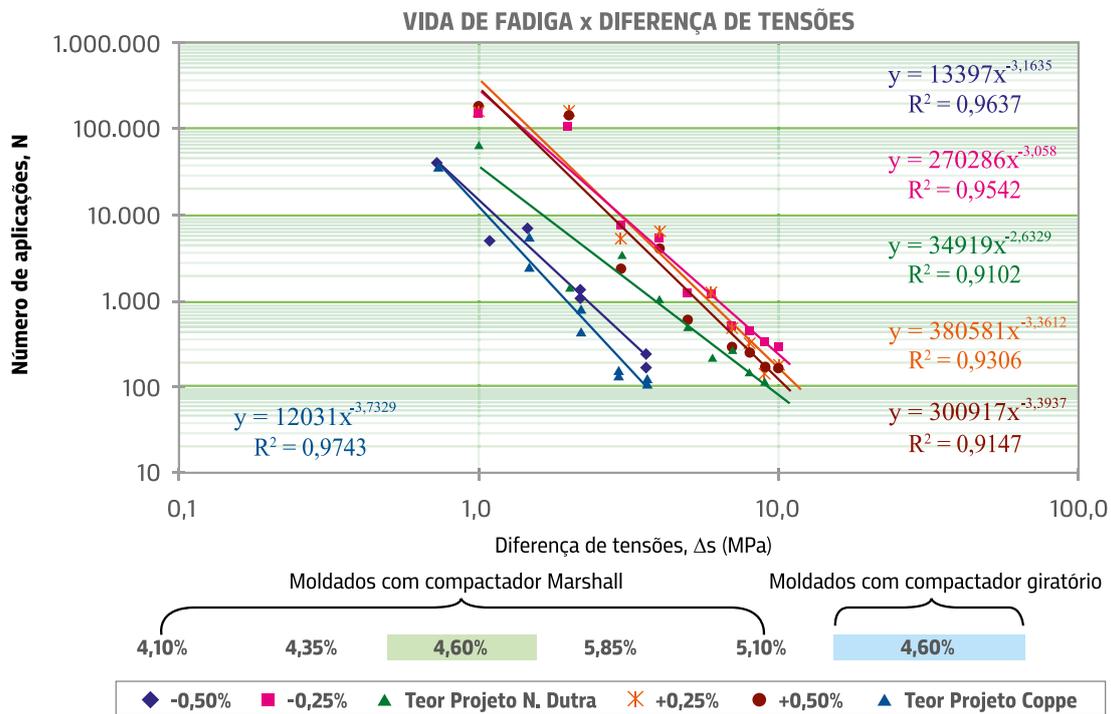
Fonte: Acervo dos autores.

Figura 8.11 – Curvas de fadiga de misturas com CAP 30-45 e faixa granulométrica 12,5mm



Fonte: Acervo dos autores.

Figura 8.12 – Curvas de fadiga de misturas com CAP 30-45 e faixa granulométrica 19,0mm



Fonte: Acervo dos autores.

8.6 Efeito na deformação permanente

A mistura asfáltica não deve se deformar plasticamente ou escoar sob ação do carregamento de tráfego. A deformação plástica ou permanente tem correlação com a superfície dos agregados, características de abrasão e granulometria. Além disso, a deformação permanente depende do teor e da consistência do ligante à alta temperatura. Deformação permanente de pavimentos asfálticos pode ter origem nas camadas inferiores e subleito ou ser proveniente do revestimento asfáltico, sendo um dos defeitos principais em serviço de pavimentação, mas que podem ser controlados com boa seleção de materiais e dosagem adequada.

A forma das partículas graúdas dos agregados é uma propriedade muito importante e tem grande influência no desempenho da mistura asfáltica. Partículas com formato mais cúbico, proporcionam melhor intertravamento e empacotamento mais denso, portanto, são mais favoráveis à resistência à deformação permanente. A angularidade do agregado fino, agora normalizada no país, é também determinada na norma europeia EN 933-6. É um método indireto de medir a angularidade do agregado fino usando o escoamento do agregado em condições de fluxo padronizadas e registra o tempo necessário para que uma determinada quantidade de agregado fino flua para fora de um recipiente de formato específico. Superfícies mais ásperas ou um formato de partícula mais angular resultam em tempos de fluxo mais longos: isso pode ser interpretado em termos de projeto de mistura asfáltica como necessidade de mais energia para obter compactação total, mas provavelmente se mostrará mais estável em uso.

A deformação permanente das misturas asfálticas também é influenciada pelo teor e tipo de ligante. O teor tem a ver com a dosagem e o controle construtivo. O tipo tem a ver com as temperaturas máximas que os revestimentos atingem em campo em cada local, em função das condições climáticas locais, portanto, o tipo de ligante asfáltico deve ser escolhido de acordo com as temperaturas esperadas no campo.

Na figura 8.13 estão ilustrados os dois mecanismos de deformação permanente que podem ocorrer no campo. A deformação permanente em misturas asfálticas sob ação do tráfego e do clima, pode eventualmente ocorrer pela densificação adicional da camada ou por fluxo de cisalhamento. Na densificação há mudança volumétrica, e, portanto, o aumento da densidade. Já no fluxo por cisalhamento, ocorrem mudanças de forma na camada asfáltica sem alteração de volume.

Figura 8.13 – Configuração de possíveis mecanismos de deformações permanentes em revestimentos asfálticos (densificação e cisalhamento)



Fonte: Otaviano, 2017.

Na figura 8.14 mostram-se exemplos de pavimentos com deformação permanente do revestimento asfáltico, que ilustram este tipo de defeito, que é função principalmente da dosagem (esqueleto mineral e ligante asfáltico selecionados), e tem forte influência da temperatura elevada e da pressão dos pneus. O ligante asfáltico deve ser selecionado em função das máximas temperaturas previstas para o local e o esqueleto mineral deve ser verificado quanto ao seu intertravamento pelos métodos de ajuste, tal como o Bailey.

Figura 8.14 – Exemplos de defeitos de deformação permanente de concreto asfáltico devido à dosagem inadequada



Fonte: Acervo dos autores.

Em laboratório existem vários métodos de ensaio, executados durante a dosagem da mistura asfáltica, desde simuladores de tráfego de laboratório até ensaios de compressão axial e triaxial. Todos têm em comum o uso de temperaturas elevadas durante o ensaio. Na figura 8.15 mostram-se três simuladores de tráfego de laboratório, existindo pelo menos um exemplar no país de cada um, que tem sido utilizados para pesquisas e dosagens de obras. Permitem fazer a avaliação da mistura asfáltica quanto ao intertravamento do esqueleto mineral e a adequação do teor e tipo de ligante asfáltico. Na figura 8.16 mostra-se um exemplo de placas ensaiadas no simulador LCPC, no APA e no Hamburg. Como exemplo, citam-se Coelho (1996), Magalhães (2004), Nascimento (2008) e Moura (2010) que utilizaram o simulador LCPC, Sá (2003) que utilizou o APA. A norma DER/PR ES-P 15/17 faz referência à utilização do APA ou do LCPC como possíveis ensaios de dosagem de concreto asfáltico. Esses equipamentos são utilizados amplamente em muitos países para analisar as misturas asfálticas durante a dosagem.

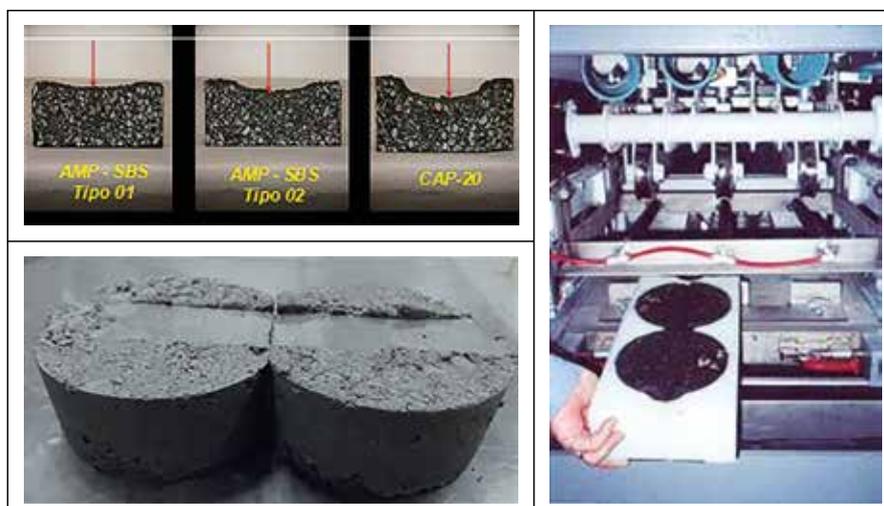
Porém, visando simplificar a análise da deformação permanente de misturas asfálticas, foram feitos estudos de comparação entre o simulador LCPC e um ensaio mais simples, de compressão axial, feito na mesma prensa onde se executam os ensaios de MR e fadiga, que recebeu o nome de Flow Number (FN). Este ensaio tem a norma DNIT 184/2018, é executado a 60°C e já está bem divulgado no país com comparações com o campo. Na figura 8.17 mostra-se exemplo de um ensaio de FN.

Figura 8.15 – Equipamentos de ensaio de deformação permanente de misturas asfálticas do tipo simulador de tráfego de laboratório



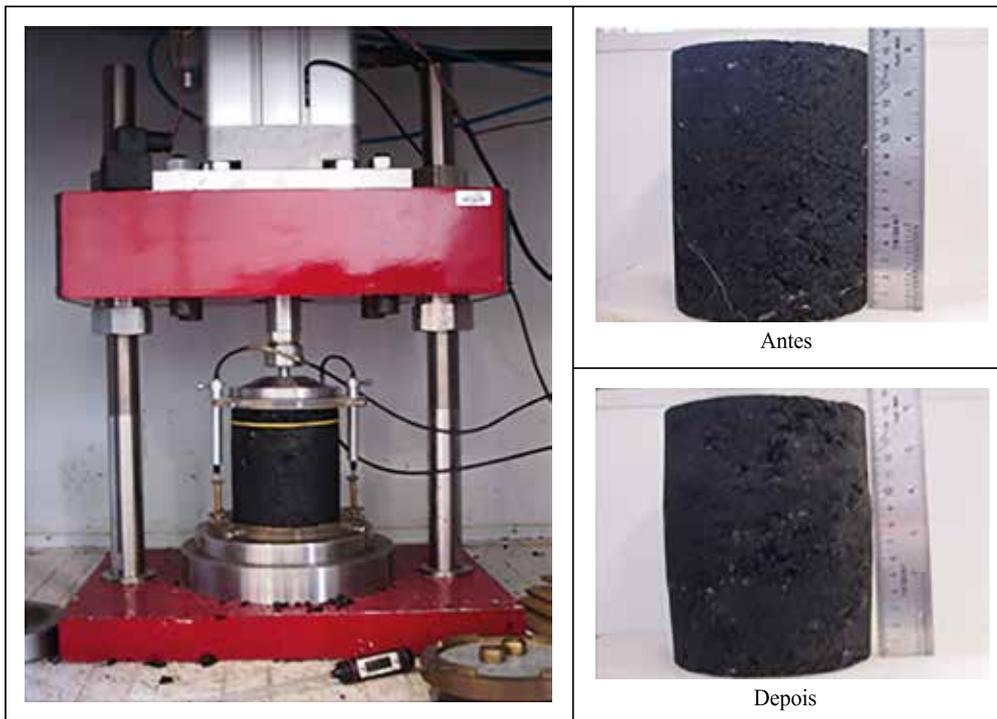
Fonte: Acervo dos autores.

Figura 8.16 – Exemplo de resultado de ensaio de deformação permanente de misturas asfálticas com os simuladores LCPC, APA e Hamburg



Fonte: Acervo dos autores.

Figura 8.17 – Exemplo de resultado do ensaio FN



Fonte: Acervo dos autores.

No revestimento asfáltico, os agregados são o material mais importante e em maior proporção na mistura. A granulometria e a angularidade são as características dos agregados que mais afetam a deformação permanente de uma mistura asfáltica, segundo as várias bibliografias consultadas, destacando-se as seguintes:

- Nascimento (2008) analisou a influência do TNM de 25, 19, 12,5 e 9,5mm de agregados, utilizando o ensaio francês de placas e o ensaio FN. Concluiu que os ensaios de deformação permanente no simulador de tráfego francês e o uniaxial de carga repetida (FN) tiveram boa correlação entre si e foram sensíveis às variações do esqueleto pétreo. Verificou boas correlações entre os resultados desses ensaios e o CDI e com o TDI. No entanto, o parâmetro $G^*/\text{sen}\phi$, oriundo do ensaio de módulo dinâmico, foi menos sensível às variações do esqueleto pétreo e apresentou menores correlações com o simulador francês e com o FN. Os valores de CDI, no teor de projeto, das misturas com diferentes ligantes asfálticos e com os mesmos agregados (granulometria e origem) foram praticamente os mesmos, indicando que esse índice independe do tipo de ligante asfáltico, o que reforça que o CDI está puramente associado aos agregados. O desempenho do ligante asfáltico em altas temperaturas tem pouca influência na resistência das misturas à deformação permanente, e não garante a estabilidade do material. Se o esqueleto pétreo não for bem escolhido, dificilmente o ligante asfáltico compensará esta deficiência. Verificou que misturas com ligantes asfálticos de maior consistência, em temperaturas elevadas, e esqueleto pétreo deficiente tiveram desempenho inferior ao de misturas com ligantes convencionais (de menor consistência) com esqueleto pétreo adequadamente projetado;

- Moura (2010) apresenta importante contribuição à avaliação da DP, com medidas de laboratório e campo sendo boa referência brasileira. Indica que volumes de vazios muito baixos (tipo 2%) são prejudiciais quanto à DP e que a redução de vazios proveniente da pós-compactação pelo tráfego não deve nunca reduzir o teor de vazios inicial para menos de 3%. Dez misturas de campo estavam fora do teor de projeto;
- Kim (2018) investigou a influência do TNM de 25, 19, 12,5, 9,5 e 4,75mm na ocorrência da deformação permanente a três temperaturas por meio do simulador de tráfego Hamburg com misturas dosadas por meio do compactador giratório. À medida que o TNM diminui, a profundidade da trilha de roda aumenta, independente da origem dos agregados, ou seja, quanto maior o TNM, maior a resistência à deformação permanente;
- Ramli (2013) determinou a angularidade dos agregados miúdos (granito e areia natural) constituintes de misturas asfálticas que foram, posteriormente, submetidas ao teste de simulador de tráfego para avaliação da resistência à deformação permanente. Os resultados mostraram que altos valores de angularidade como dos agregados graníticos apresentaram menor profundidade de trilha de roda que as misturas que continham areia natural. Assim, concluiu-se que agregados miúdos com forma mais angular apresentam melhor resistência à deformação permanente);
- na África do Sul foi investigada a importância da graduação de diferentes curvas granulométricas com TNM de 19mm na resistência à deformação permanente, por meio dos parâmetros volumétricos – teor de vazios e VAM e ainda pelo módulo de resiliência e resistência à tração. Verificou-se que a menor deformação é resultante de misturas com agregados no limite superior da faixa granulométrica. Os agregados do limite inferior apresentaram altas taxas de deformação quando comparadas com os de limite superior;
- Schuster (2016) avaliou a influência da quantidade de areia natural na característica de deformação permanente (DP) de uma mistura asfáltica, concluindo que porcentagens acima de 3% de areia influenciaram negativamente a resistência à DP medida pelo FN. Quando usou 4% de areia natural, houve decréscimo do número de ciclos para atingir a zona terciária, levando a mistura a se deformar mais do que a mistura sem areia. Acima de 4% a mistura ficou comprometida quanto à DP;
- Bastos et al. (2014) avaliaram a deformação permanente em laboratório e em campo. A mistura do Ceará teve DP em campo e a de São Paulo teve bom comportamento, o que foi previsto pelo ensaio de FN em laboratório;
- Pazos (2015) avaliou o FN de misturas asfálticas preparadas com brita lamelar, brita cúbica, seixo rolado e combinações distintas de brita cúbica e seixo rolado. A mistura com brita cúbica apresentou o maior FN em relação às demais e três vezes maior do que a mistura só com seixo;
- Bastos (2016) apresenta detalhados ensaios tanto de agregados quanto do ligante e, também, avaliações de campo de trechos. Tem muitas análises interessantes e deve

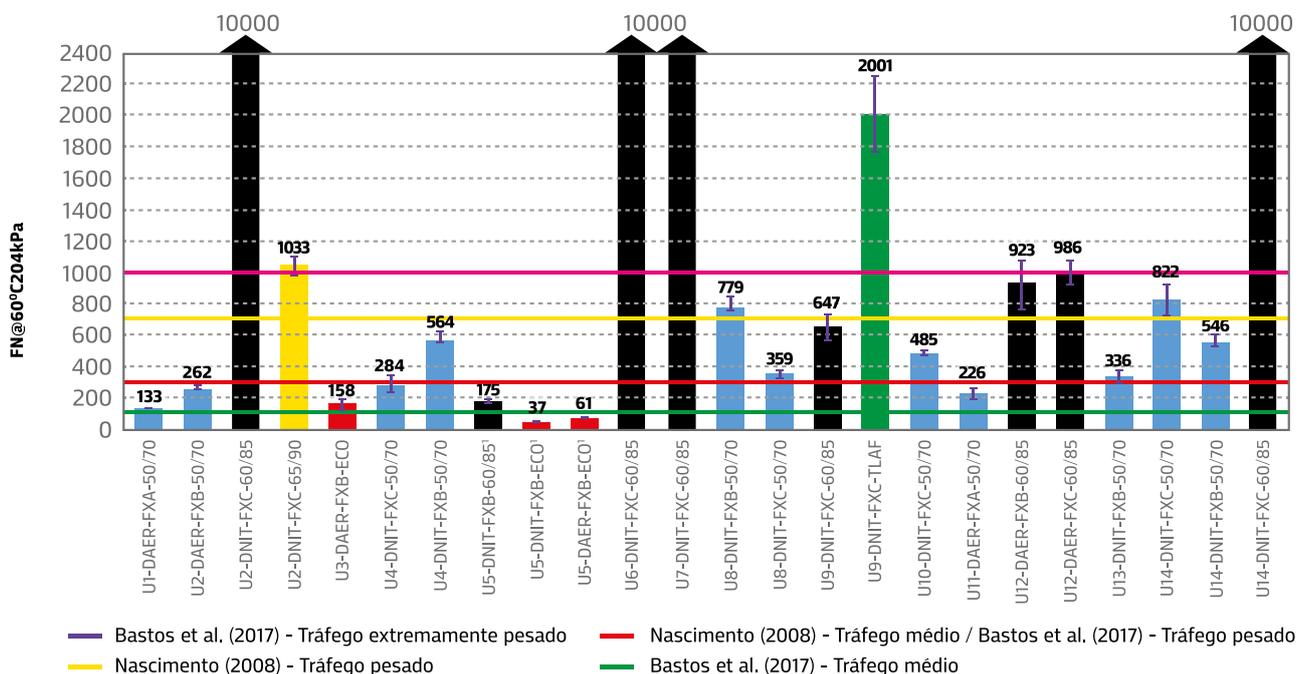
ser consultado diretamente pelo seu conteúdo. Destacando um pequeno comentário, analisou a correlação do FN, teor de ligante, características dos ligantes, parâmetros de granulometria e forma dos agregados de sete misturas asfálticas, propondo um modelo preditivo e correlacionando com os procedimentos Bailey e FAD;

- Almeida Jr. (2016) analisou uma combinação de condições de dosagem que resultou em 16 misturas asfálticas. Avaliou a RT, MR, módulo complexo e o FN. Utilizou um CAP convencional e um modificado por polímero. O método Bailey de seleção granulométrica melhorou o comportamento da DP e a dosagem Superpave também porque reduziu o teor de ligante em relação à dosagem Marshall;
- Centofante (2016) avaliou quatro misturas asfálticas com adição de (0, 10, 20 e 30%) de material fresado na composição granulométrica feita com um agregado virgem de rocha ácida (riodacito), todas com o mesmo ligante asfáltico. Verificou que, quando se aumentou a quantidade de fresado, o FN aumentou consideravelmente;
- Otaviano (2017) analisou alguns fatores que influenciam o desempenho da mistura asfáltica dosada por um método tradicional comparada ao desempenho obtido com a utilização do método Bailey e FAD. Analisou as curvas granulométricas das misturas, os parâmetros obtidos no compactador giratório e a deformação permanente. Os resultados indicam boa atuação do método Bailey na previsão da resistência à deformação permanente obtida em laboratório, entretanto, durante a fase executiva da obra, constatou-se que a curva granulométrica de projeto não foi obedecida, evidenciando que alterações na distribuição da granulometria dos agregados podem resultar em defeitos construtivos na rodovia;
- Barros (2017) avaliou a deformação permanente de misturas a quente e mornas, pelo critério de FN. Analisou 10 misturas asfálticas, variando o ligante e os agregados pétreos, em composição densa e gap graded (GG). Usou dois tipos de cal (calcítica e dolomítica). Avaliou as mesmas misturas feitas a quente e morna. As misturas mornas tiveram desempenho inferior ao das respectivas misturas quentes. Seis das 10 misturas avaliadas não alcançaram o FN de 300, indicado para tráfego médio, sendo as misturas com asfalto polímero e a GG com asfalto borracha e cal calcítica as de melhor desempenho. Também realizou ensaios de MR, RT e MD.

Destacando uma referência, Faccin (2018) avaliou 24 misturas asfálticas de usinas e em laboratório e 15 locais onde foram aplicadas em campo para observar o problema de deformação permanente, sob diferentes tipos de tráfego. Avaliou os procedimentos Bailey e FAD, morfologia dos agregados com métodos tradicionais e com o AIMS, MR, RT, FN e módulo complexo. Os corpos de prova foram feitos no compactador giratório. Como grande diferencial está a coleta das misturas nas usinas e o acompanhamento em campo, mesmo com os percalços naturais que acontecem. Para medição do afundamento de trilha de roda (ATR) no campo foi usada a treliça metálica, como

definida pelo DNIT, na trilha externa, e tomada a média das leituras a cada 5m, numa extensão de 50m monitorada. Os agregados minerais foram de diversas pedreiras e as obras em vários pontos do estado do Rio Grande do Sul. Os ligantes asfálticos foram o CAP 50-70 e quatro ligantes modificados. As usinas foram do tipo contínua contrafluxo (10) de diferentes marcas, contínua fluxo paralelo (1) e granulométrica (3). A maioria das obras era de restauração, e algumas de duplicação. Entre as 24 misturas, apenas oito apresentaram os percentuais de todas as peneiras dentro da faixa de trabalho do projeto de dosagem. Aqui se destacam somente os resultados de FN obtidos, mostrados na figura 8.18. Esses valores expressam a influência dos agregados e dos ligantes. A comparação com o campo tem muitos detalhes e deve ser consultada diretamente na referência. São muitas variáveis e não foi possível uma análise global de todos os segmentos e o tempo de observação foi pequeno. No entanto o autor conclui que os critérios de FN propostos por Nascimento (2008) foram coerentes com os resultados de campo e que o tipo de ligante teve efeito determinante no desempenho à DP. A figura 8.19 resume os vários elementos que contribuem positiva ou negativamente para a deformação permanente das misturas asfálticas, compilados por Faccin (2018).

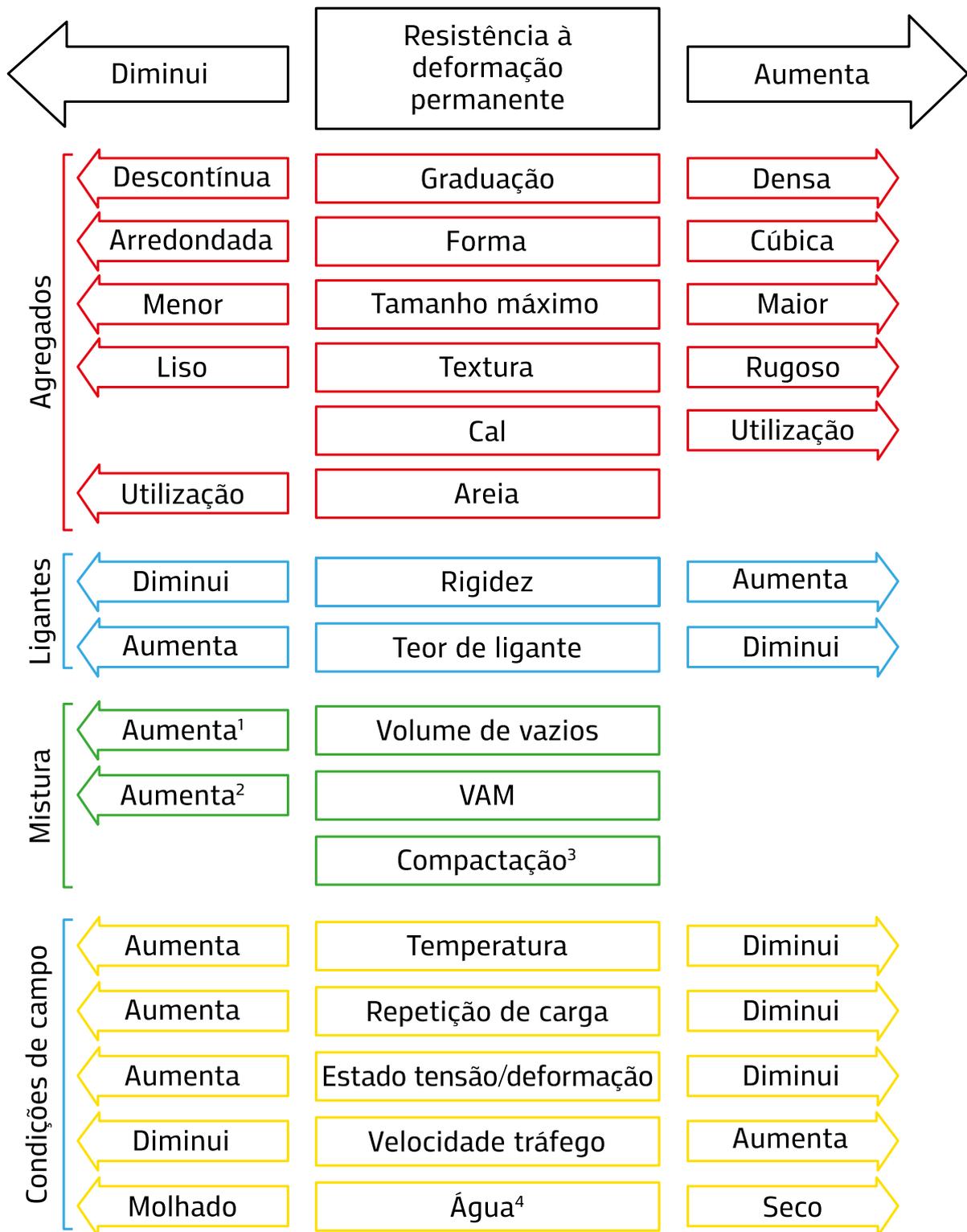
Figura 8.18 – Valores de FN das misturas analisadas e limites propostos por autores



Nota: ¹ Misturas mornas.

Fonte: Faccin, 2018.

Figura 8.19 – Fatores que interferem na deformação permanente de misturas asfálticas



¹ Quando Vv é menor que 3%, a propensão à deformação permanente aumenta.

² VAMs muito baixos (menores que 10%) devem ser evitados.

³ O método de compactação pode influenciar a propensão aos afundamentos plásticos.

⁴ Exerce influência se a mistura é sensível à água.

Fonte: Faccin, 2018.

9. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE CONCRETO ASFÁLTICO NECESSÁRIAS PARA O MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MEDINA

No novo método de dimensionamento do DNIT, MeDiNa, são exigidos os ensaios mecânicos de módulo de resiliência, resistência à tração, FN e fadiga.

Na figura 9.1 mostram-se fotos dos ensaios e as normas DNIT correspondentes, enquanto nas tabelas 9.1 e 9.2 estão indicados os valores estabelecidos como referência para os concretos asfálticos em relação à classe de fadiga e à deformação permanente, expressa pelo FN.

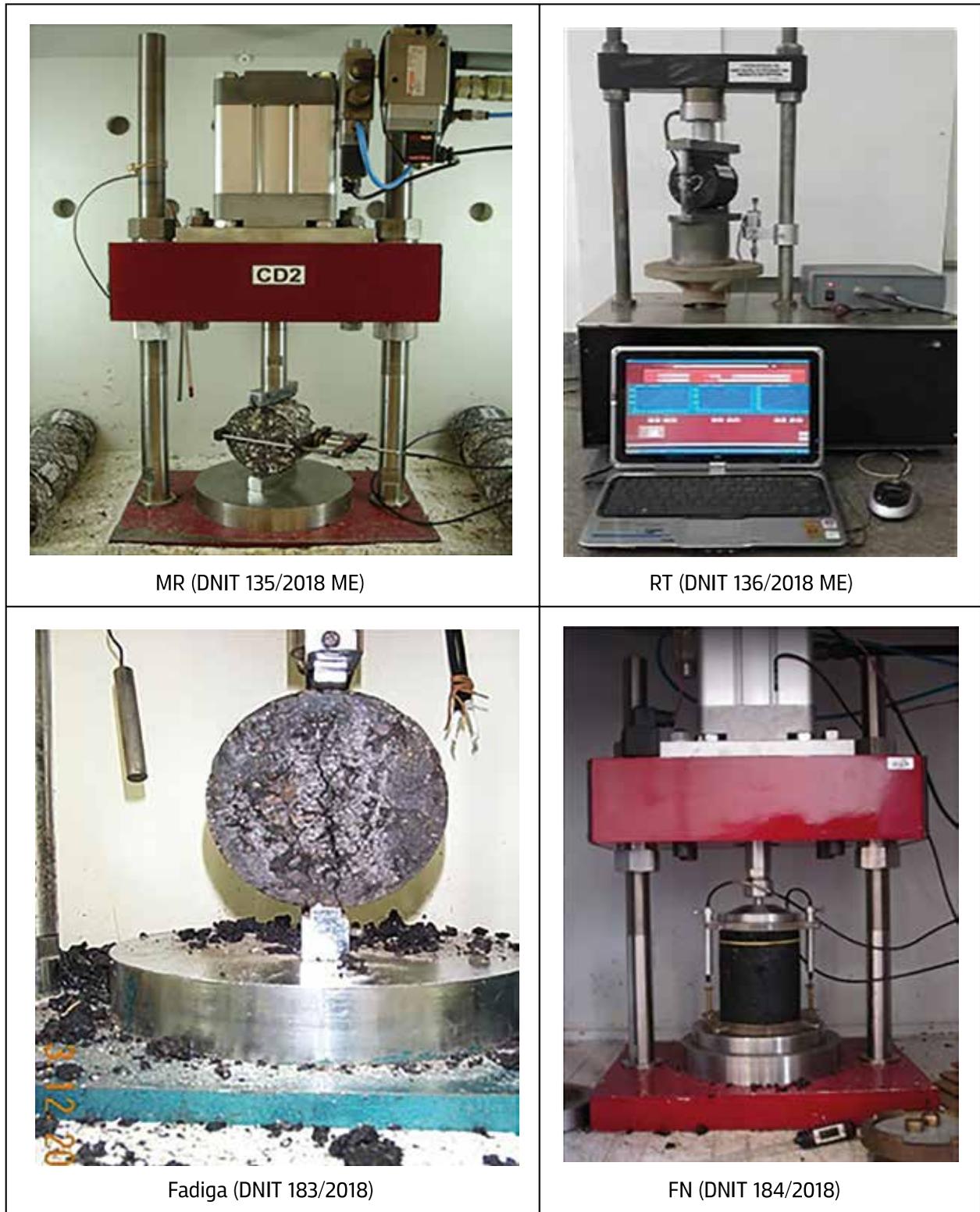
Para o CDI e TDI, visando ao adequado desempenho em termos de deformação permanente, recomendam-se os seguintes critérios para a dosagem de misturas asfálticas densas utilizadas como camada de revestimento em rodovias brasileiras (Nascimento, 2008):

- a) Tráfego médio: CDI > 50; TDI > 250;
- b) Tráfego pesado: CDI > 50; TDI > 400.

O projetista define uma mistura asfáltica com determinado valor de módulo de resiliência (MR), resistência à tração (RT), resistência à deformação permanente (FN) e fadiga. Esses valores estão correlacionados com os agregados (morfologia, curva granulométrica), com o ligante asfáltico (tipo e teor ótimo) e grau de compactação. Na obra esses valores terão de ser respeitados, como indica o exemplo de relatório do MeDiNa mostrado na figura 9.2.

Esses valores foram estabelecidos durante o projeto entre o DNIT e a Coppe, para o desenvolvimento do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos MeDiNa, entre os anos 2014 e 2018, com a participação de muitos pesquisadores nas reuniões de decisão junto com a equipe do IPR. Mais de 40 normas de ensaio e algumas especificações de serviço foram revistas ou criadas, visando inclusive à análise dos agregados que compõem as misturas asfálticas. Muitas já estão publicadas, como as indicadas na figura 9.1, e outras continuam em análise no IPR/DNIT.

Figura 9.1 – Ensaios obrigatórios para o concreto asfáltico para o dimensionamento pelo MeDiNa



Fonte: Acervo dos autores.

Tabela 9.1 – MeDiNa – FN a ser atendida em função do volume de tráfego como critério de deformação permanente na dosagem do concreto asfáltico

Classe	Flow number (FN)	N recomendado condições normais	N recomendado condições severas
1	$FN \leq 100$ ciclos	$N < 1 e 6$	Não recomendado
2	$100 \text{ ciclos} \leq FN < 300$ ciclos	$1 e 6 \leq N < 1 e 7$	$N < 1 e 6$
3	$300 \text{ ciclos} \leq FN < 750$ ciclos	$1 e 7 \leq N < 1 e 8$	$1 e 6 \leq N < 1 e 7$
4	$750 \text{ ciclos} \leq FN < 2000$ ciclos	$N \geq 1 e 8$	$1 e 7 \leq N < 1 e 8$
5	$FN \geq 2000$ ciclos	-	$N \geq 1 e 8$

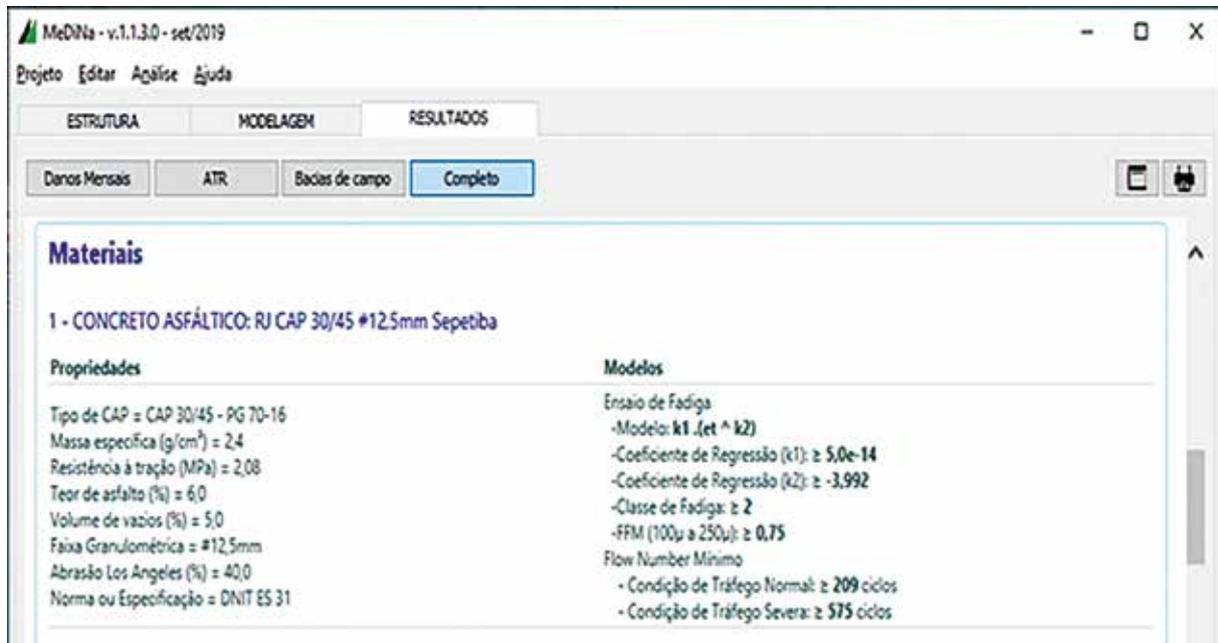
Valores intermediários são interpolados.
Fonte: Nascimento (2014).

Tabela 9.2 – Expressões das classes de fadiga de concreto asfáltico no software MeDiNa

Classe fadiga	MR (MPa)	$N = k_1 \varepsilon^{k_2}$		FFM
		K_1	K_2	
1	5764	$5,496 e^{-11}$	-3,253	0,84
2	6743	$1,110 e^{-13}$	-3,979	0,86
3	8000	$1,000 e^{-12}$	-3,750	0,90
4	10492	$1,920 e^{-5}$	-1,900	1,00

Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 9.2 – Exemplo de dados de uma mistura asfáltica inserida no MeDiNa, para o dimensionamento e a serem atendidos na obra



Fonte: Manual do programa MeDiNa (DNIT).

10. ASPECTOS DE SMS

Neste item, os autores tiveram a colaboração do biólogo Niel Eferson Amorim da Secretaria de Infraestrutura da Bahia, em relação às normas e procedimentos aqui apontados.

Conforme estabelecido na Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011, que firmou cooperação entre União, estados, Distrito Federal e municípios, foi dado poder a cada um de realizar a Gestão do Licenciamento Ambiental, considerando o impacto local em área sob sua jurisdição. Assim, cada entidade tem o poder de estabelecer critérios para o licenciamento ambiental de empreendimentos que gerem impactos locais, diversificando os procedimentos para os atos do licenciamento ambiental.

Nesta perspectiva, serão abordados sucintamente os critérios estabelecidos à luz da legislação do estado da Bahia, Lei nº 10.431, de 20/12/2006, aprovada pelos Decretos nº 14.024, de 6/6/2012, 15.682, de 19/11/2014, 16.963, de 17/8/2016, e 18.218, de 3/3/2018 e seus anexos, e a Portaria Inema nº 11.292, de 13/2/2016, que estabelecem os procedimentos, os documentos e os estudos necessários para o licenciamento ambiental no âmbito estadual.

O órgão responsável pelo licenciamento ambiental no estado da Bahia é o Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (Inema), que, obedecendo à legislação citada, enquadra os empreendimentos, classifica-os e estabelece o tipo de licença pertinente à atividade.

Ressalta-se também a possibilidade da regularização ambiental para a exploração das áreas de jazidas, pedreiras e areais junto às prefeituras que, estando habilitadas, realizam o licenciamento ambiental, tendo a legislação ambiental específica, podendo diferir os procedimentos e a tipologia da licença ambiental, eventualmente.

Por se tratar de um bem mineral e conforme o Código de Mineração, Decreto-lei nº 227, de 28/2/1967, compete à União administrar os recursos minerais, a indústria de produção mineral e a distribuição, o comércio e o consumo de produtos minerais pertencentes ao subsolo, devendo ser solicitada a liberação para exploração desses bens junto à Agência Nacional de Mineração (ANM).

Durante e após a exploração das áreas de jazidas, devem ser considerados os impactos gerados pelas atividades, desde a fase inicial, com a supressão de vegetação da área, devendo ser tomados todos os cuidados ambientais pertinentes, durante a operação, com a movimentação das máquinas, a utilização dos equipamentos de proteção individual e, principalmente, para o caso das pedreiras, devido à utilização dos explosivos que proporcionam impactos mais significativos, causando desconforto às comunidades vizinhas, podendo afetar fisicamente construções próximas às mesmas. E, na desmobilização, deve a área ser reconformada e recuperada conforme as especificações técnicas do DNIT, dos DERs ou dos órgãos estaduais gestores da malha rodoviária dos estados.

Nas normas de especificação de serviços de pavimentação do DNIT, sempre tem um item que descreve os cuidados a serem tomados quanto ao SMS de cada tipo de material. Recomenda-se que essas orientações sejam analisadas e cumpridas. Nos ensaios de laboratório também existem muitas práticas de SMS que devem fazer parte do dia a dia, durante os ensaios diversos.

Em relação ao ambiente das pedreiras, como o agregado é o foco desta publicação, recomenda-se a leitura da dissertação de Bem (2006) que enfoca as atividades em instalações de britagem propondo um modelo para analisar, avaliar e melhorar o funcionamento destas, com ênfase na saúde e segurança dos trabalhadores. Foram enfocados aspectos ambientais, trabalhistas, previdenciários e de segurança do trabalho. O modelo considera os diversos fatores que intervêm neste tipo de instalação e foi feito um estudo de caso. Constatou que muitas empresas desconhecem os diversos aspectos de SMS nessa atividade. Em geral é uma estrutura complexa, com muitas máquinas, equipamentos e pessoas, com emissão de poluição e ruídos, a céu aberto.

Bem (2006) apresenta fluxogramas nos quais se baseou para fazer sua análise de uma instalação de britagem particular, mostra os questionários utilizados e as ferramentas de análise.

Em matéria de meio ambiente, a legislação brasileira é rigorosa quanto aos aspectos ambientais sob o ponto de vista de emissões, tanto de particulados como de ruídos e uso de explosivos. O ambiente de trabalho numa pedreira é considerado insalubre pelas emissões de poeira, ruído e vibrações. A sílica presente na poeira pode provocar silicose nos trabalhadores eventualmente, e o ruído forte, contínuo ou intermitente em excesso, pode provocar perda de audição. A vibração contínua pode provocar perda de equilíbrio e distúrbios de atenção, entre outros danos aos trabalhadores. O uso de equipamentos de proteção individual (EPIs) e coletiva deve ser obrigatório.

A figura 10.1 mostra o ambiente de uma pedreira com a nuvem de poeira e a visão de uma forma de combate à poeira em suspensão que é um sistema de bicos atomizadores (sprays) que formam uma névoa de microbolhas que contêm a poeira e não molham o produto.

Figura 10.1 – Fotos de emissão de poeira numa instalação de britagem e forma de combate com sistema de microbolhas



Fonte: Bem, 2006.

Como exemplo de consideração sobre a questão ambiental envolvendo os agregados, citam-se a seguir as recomendações que estão inseridas na especificação de serviço do DER do Paraná, no item manejo ambiental (DER/PR ES-P 15/17):

Os cuidados a serem observados para preservação do meio ambiente envolvem a produção e aplicação de agregados (Agregados DER/PR ES-P 15/17 14/22):

- a) Receber a brita e a areia somente com a apresentação da licença ambiental de operação da pedreira/areal, cuja cópia da licença deve ser arquivada junto ao Livro de Registro de Ocorrências da obra.
- b) Exigir a documentação emitida pelo órgão ambiental competente atestando a regularidade das instalações e da operação da pedreira/areal/usina, caso estes materiais sejam fornecidos por terceiros.
- c) Evitar a localização da pedreira e das instalações de britagem em área de preservação ambiental.
- d) Planejar adequadamente a exploração da pedreira de modo a minimizar os danos inevitáveis durante a produção e possibilitar a recuperação ambiental após a retirada de todos os materiais e equipamentos.
- e) Construir junto às instalações de britagem bacias de sedimentação para retenção do pó de pedra eventualmente produzido em excesso ou por lavagem da brita evitando seu carreamento para cursos d'água.
- f) É proibida a utilização de queimadas como forma de desmatamento e limpeza. Para desmatamento é necessário obter a respectiva autorização junto ao órgão ambiental competente.

Indicam-se a seguir referências sobre aspectos de SMS na pavimentação asfáltica, levando em conta a exploração das pedreiras, a usinagem das misturas asfálticas e a aplicação na pista: Guimarães (2004); Fernandes (2007); Cravo (2010); Motta (2011); Cravo et al. (2010); Fontenele (2015); Fontenele et al. (2018); Santos (2018); Ribeiro et al. (2018); Barbosa (2019), entre outros.

11. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os agregados compõem a maior parte das misturas asfálticas. Sua seleção adequada tem importância fundamental na vida útil das camadas asfálticas e do pavimento. São muitos os aspectos a serem considerados: hoje tem-se como compreender melhor os efeitos dos agregados e como contornar alguns aspectos quando não é possível outra fonte. A dosagem de uma mistura asfáltica deve ser feita considerando toda a estrutura do pavimento onde será aplicada.

Procurou-se nesta publicação agrupar as principais informações sobre os agregados e suas características morfológicas e mecânicas e como influenciam nas misturas asfálticas. Em todos os tipos de revestimentos asfálticos, desde o microrrevestimento, tratamento superficial, pré-misturado a frio, concreto asfáltico e misturas especiais, a seleção do agregado é peça fundamental para o sucesso de um pavimento.

No novo método de dimensionamento MeDiNa, foram consideradas classes de fadiga de concreto asfáltico e classes de FN a serem atendidas no dimensionamento e na dosagem. A dosagem de um concreto asfáltico faz parte do dimensionamento: função dos agregados (morfologia e curva granulométrica) e do ligante asfáltico (tipo e teor).

Como sugestão para consulta e para estímulo para a continuidade dos estudos sobre agregados e os seus critérios de seleção para compor os diversos tipos de misturas asfálticas, cita-se a norma europeia EN13043/2013: Agregados para misturas betuminosas e tratamento superficial para rodovias, aeroportos e outras áreas trafegáveis. Tem mais de 40 páginas e contempla um grande número de ensaios e limites. O sumário dessa norma está reproduzido no Anexo 2.

É preciso caminhar aqui para o tipo de compromisso das partes envolvidas que existe na Europa: todo agregado usado na produção de mistura asfáltica deve passar por algum processamento, com avaliações e ensaios, para que o fornecedor, ao entregar um produto, possa mostrar que atendeu às demandas de um especificador do produto.

É responsabilidade do especificador garantir que suas especificações possam fornecer um produto adequado ao objetivo a que se destina e é responsabilidade do produtor do agregado ter fornecimento consistente dos diversos materiais que atendam aos níveis de desempenho especificado. A partir de 1 de julho de 2013, em todos os países membros da União Europeia, o Regulamento 2011 (CE, 2011) tornou obrigatório que todos os produtos fossem produzidos com padrões europeus harmonizados, e isso inclui os agregados usados em misturas asfálticas ou em outras camadas do pavimento, conforme a norma EN 13043, e devem ter a marca CE. A marcação CE garante que os agregados usados na construção não apenas atendam aos requisitos das normas europeias relevantes, mas também sejam seguros, técnica e ambientalmente. A adesão a sistemas reconhecidos de controle de produção da fábrica (CPF) garante que esses dois requisitos estejam sendo cumpridos.

REFERÊNCIAS

- AAPA. *Asphalt moisture sensitivity*. Advisory note 1. Australian Asphalt Pavement Association. 2017.
- AASHTO T324-11. *Hamburg Wheel-Track testing of compacted hot mix asphalt (HMA)*. 2011.
- ABNT NBR 15617. *Misturas asfálticas – determinação do dano por umidade induzida*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.
- ABNT NBR 15619. *Misturas asfálticas – determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.
- ABNT, NBR 16505. *Misturas asfálticas – resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.
- AIREY, G. D.; COLLOP, A. C.; ZOOROB, S. E.; ELIOTT, R. C. The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage. *Construction and Building Materials*, n. 22, p. 2015-2024, 2008.
- ALBERNAZ, C. A. V. *Método simplificado de retroanálise de modulo de resiliência de pavimentos flexíveis a partir da bacia de deflexão*. Dissertação. Coppe/UFRJ. 1997.
- ALECRIM, C. M. C.; MAIA, R. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F. *Proposição da dosagem e avaliação da utilização de asfalto reciclado em camada porosa de atrito*. 33. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), Balneário Camboriú, 2019.
- ALI, N.; et al. Mechanistic evaluation of fly ash asphalt concrete mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 8, n. 1, p. 19-25, 1996.
- ALMEIDA JR, P. O. B. *Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem*. Dissertação. UFSM. 2016.
- _____ et al. Avaliação laboratorial do tipo e teor de ligante e da granulometria na deformação permanente de misturas asfálticas. *Revista Transportes*, v. 21, 2018.
- ALVES, V. A. H. S. *Avaliação da resistência à degradação mecânica de agregados da Região Metropolitana do Rio de Janeiro por técnicas digitais de imagens*. Dissertação. UFRJ. 2014.
- AMARAL, S. C. *Estudo de misturas asfálticas densas com agregados do estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (Betuflex B 65/60)*. Dissertação. USP – São Carlos. 2000.
- _____. *Estudo de misturas laterita-asfalto da Região Metropolitana de Belém-PA para revestimentos de pavimento*. Tese. USP. 2004.

ANDERSON, D. A. et al. *Effect of minus n. 200 sized aggregate on fracture behaviour of dense-graded hot-mix asphalt*. Effects of aggregates and mineral fillers on asphalt mixture performance. ASTM STP 1147, p. 154-176, 1992.

ANITELLI, A. Estudo do dano por umidade de misturas densas com ligantes asfálticos convencional e modificado com polímero SBS. Dissertação. USP SC. 2013.

AODAH, H. H.; KAREEN, Y. N. A.; CHANDRA, S. Effect of aggregate gradation on moisture susceptibility and creep in HMA. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, n. 72, 2012.

ARAGÃO, F. T. S. et al. Effects of morphological characteristics of aggregate particles on the mechanical behavior of bituminous paving mixtures. *Construction and Building Materials*, v. 123, p. 444-453, 2016.

ARAUJO, V. M. C.; BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F. *Avaliação da textura de misturas asfálticas com uso do processamento digital de imagens*. 28. Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes. ANPET. 2014.

_____. *Avaliação da textura de misturas asfálticas para uso em revestimentos aeroportuários a partir do uso do processamento digital de imagens*. Dissertação. UFC. 2016.

_____; BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F. Measuring skid resistance of hot mix asphalt using the aggregate image measurement system (AIMS). *Construction and Building Materials*, v. 98, p. 476-481, 2015.

ARTERIS T 330-07. *Detecção qualitativa de argilas prejudiciais do grupo esmectita em agregados utilizando azul de metileno*. 2011.

BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração. *Oficina de Textos*, 2007.

BARBOSA, L. M. *Avaliação das concentrações de material particulado, NO₂ E SO₂ resultantes dos serviços de pavimentação asfáltica em um ambiente urbano*. Dissertação. UFC. 2019.

BARBOZA JR, V. S. *Efeito deletério da água em misturas asfálticas com adição de ligante modificado com polímero e de cal*. Dissertação. UFSM. 2018.

BARRA, B. S. *Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas utilizando materiais do estado do Pará com emprego de pó calcário*. Dissertação. UFSC. 2005.

_____. *Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas*. Tese. UFSC. 2009.

BARROS, L. M.; BRITO, L. A. T.; CERATTI, J. A. P. Desempenho quanto à deformação permanente de misturas asfálticas com diferentes ligantes. *Anais do XVIII Congresso Ibero Latinoamericano del Asfalto (CILA)*, p. 325-333. Bariloche, Argentina, 2015.

_____. *Deformação permanente de misturas asfálticas: avaliação do desempenho pelo critério de flow number de misturas quentes e mornas*. Dissertação. UFRGS, Porto Alegre. 2017.

BARROSO, L. X. *Avaliação da dosagem e do comportamento mecânico de concretos asfálticos produzidos em Goiás*. Dissertação. UFG. 2018.

BASTOS, J. B. S. et al. Avaliação em laboratório e em campo da deformação permanente de pavimentos asfálticos do Ceará e de São Paulo. *Revista Transportes*, v. 22, n. 2, 2014.

_____. *Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico*. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia de Transportes, UFC, Fortaleza, 2016.

_____; SOARES, J. B.; NASCIMENTO, L. A. H. Critério para os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida de misturas asfálticas em laboratório a partir do desempenho em campo. *Transportes*, v. 25 n. 2, p. 25-40, 2017.

BELIGNI, M.; VILLIBOR, D. F.; CINCERRI, J. R. *Misturas asfálticas do tipo SMA (Stone Mastic Asphalt): solução para revestimento de pavimentos de rodovias e vias urbanas de tráfego intenso*. Simpósio Internacional de Manutenção e Restauração de Pavimentos e Controle Tecnológico. São Paulo. 2000.

BEM, S. S. *Instalações de britagem, condições de trabalho e de processo: uma abordagem de saúde e segurança*. Dissertação. UFRGS. 2006.

BERNUCCI, L. L. B. et al. *Pavimentação asfáltica – formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro, RJ. 2010.

BESSA, I. S. *Avaliação do processamento digital de imagens como ferramenta para caracterização de agregados e misturas asfálticas*. Dissertação. UFC, 2012.

_____ et al. Aggregate shape properties and their influence on the behavior of hot-mix asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27, n. 7, p. 04014212, 2014.

_____; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. Evaluation of polishing and degradation resistance of natural aggregates and steel slag using the aggregate image measurement system. *Road Materials and Pavement Design*, p. 1-21, 2014.

_____ et al. Aggregate shape properties and their influence on the behavior of hot-mix asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 8, p. 04014212, 2014.

_____ et al. Design of cold recycled mixes with asphalt emulsion and Portland cement. *Canadian Journal of Civil Engineering*, p. 773-782, 2016.

BOCK, A. L. *Desempenho à fadiga de misturas em concreto asfáltico com diferentes formas de incorporação de cal*. TCC. Unijuí. 2009.

_____. *Efeitos da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado*. Dissertação. UFRGS. 2012.

BORDIN, D. T. et al. *Avaliação de misturas 100% RAP frente à rigidez e à deformação permanente*. 32. Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. Gramado. 2018.

BORGES, R. L. *Deformação permanente em misturas asfálticas a partir do shift model viscoelástico e ensaios triaxiais de carga repetida*. Dissertação. UFC. 2014.

BRONDANI, C. *Estudo do efeito deletério da água em misturas asfálticas a quente produzidas no Rio Grande do Sul*. Dissertação. UFSM. 2019.

BUDNY, J. *Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas*. Dissertação de mestrado. Coppe, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação. UFRJ. Rio de Janeiro, RJ. 2012.

_____ et al. *Comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas com ligante espumado*. Reunião Anual de Pavimentação, Fortaleza. 41. RAPv, 2012.

CABRAL, G. L. L. et al. *Agregado artificial de argila calcinada: a metodologia de produção, a primeira produção experimental e a proteção da inovação tecnológica*. Congresso Ibero-Latinoamericano de Asfalto, 2007, Havana. XIV CILA.

_____. *Utilização do agregado artificial de argila calcinada em obras de pavimentação e aperfeiçoamento da tecnologia*. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ. 2011.

CARNIN, R. L. P. *Reaproveitamento do resíduo de areia verde de fundição como agregado em misturas asfálticas*. Tese de doutorado. UFPR. 2008.

CASTELO BRANCO, V. T. F. *Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, UFRJ. 2004.

_____ et al. *Caracterização de forma, angularidade e textura de agregado de brita granítica e escórias de aciaria usando o Aggregate Imaging System (AIMS)*. ANPET, 2006.

CASTRO NETO, A. M. *Proposta de projeto de dosagem de concreto betuminoso reciclado a quente*. Dissertação de mestrado em Engenharia de Transportes, USP. 2000.

CASTRO, L. N. *Reciclagem a frio in situ com espuma de asfalto*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Coppe/UFRJ. 2003.

CASTRO, P. B. *Avaliação do emprego de agregados alternativos em microrrevestimento asfáltico*. Dissertação de mestrado. UFC. Fortaleza, CE, 2014.

CAVALCANTE, V. T. F.; SOARES, J. B. *O efeito do tipo e do teor de filler nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas*. 33. Reunião Anual de Pavimentação. ABPv. Florianópolis. 2001.

CAVALCANTI, H. P. P. *Avaliação do efeito do polimento nas propriedades de forma de agregados utilizando o processamento digital de imagens*. TCC, graduação em Engenharia Civil. UFC. 2016.

_____ et al. Avaliação da degradação de propriedades de forma de agregados. *Matéria*, Rio de Janeiro, v. 25, p. 1, 2020.

CAVALCANTI, L. S. *Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas*. Dissertação. Coppe/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ. 2010.

CENTOFANTE, R. *Estudo laboratorial da utilização de material fresado em mistura asfáltica reciclada a quente*. Dissertação. UFSM. 2016.

CERATTI, J. A. P.; REIS, R. M. M. de. *Manual de dosagem de concreto asfáltico*. São Paulo: Oficina de Textos; Rio de Janeiro: Instituto Pavimentar, 2011. 151p.

CHAVES, F. J.; MOTTA, L. M. G. *Estudos de algumas areias do estado do Ceará para utilização em misturas asfálticas a frio*. 18. Encontro de Asfalto, 2006, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2006.

CHAVES, J. M. et al. *Mistura asfáltica tipo SMA delgado em um trecho experimental de uma rodovia com elevado volume de tráfego*. 16. Encontro de Asfalto. IBP. 2002.

_____ et al. *Avaliação de formação de trilha de rodas com diferentes tipos de mistura – 3 anos*. Recursos para Desenvolvimento Tecnológico (RDT), Rodovias BR 116/376 PR e BR 101, Trecho Curitiba – Florianópolis, 2011.

COELHO, V. *Contribuição ao estudo das deformações permanentes, nas condições do Brasil, em camadas de concreto asfáltico de pavimentação*. Tese. Escola de Engenharia de São Carlos da USP, 1996.

COLPO, G. B. *Análise de fadiga de misturas asfálticas através do ensaio de flexão em viga de quatro pontos*. Dissertação. UFRGS. 2014.

COSME, R. L. *Estudo reológico de mástiques com filer de resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) e escória de aciaria (EMA)*. Dissertação. Ufes. 2015.

COSTA, C. J. B. *Mistura asfáltica com areia de fundição de ferro descartada*. Dissertação. IME. 2008.

COSTA, H. N. *Caracterização de areias de britagem de pedreiras da Região Metropolitana de Fortaleza e avaliação da sua aplicação em concreto*. Dissertação. UFC. 2015.

COUTINHO NETO, B. *Reaproveitamento do resíduo de fundição em misturas asfálticas*. Tese de doutorado – USP. USP São Carlos, 2004.

_____; FABBRI, G. T. P. Avaliação da reutilização da areia de fundição em misturas asfálticas densas do tipo CAUQ. *Transportes*, v. 12, n. 2, 2004.

CRAVO, M. C. C. *Estudos relacionados aos fumos de asfalto*. Conferência proferida durante o 3. Workshop em SMS – Comissão de Asfalto do IBP. São Paulo, 2010.

_____. et al. *Toxicological studies from Brazilian asphalt fumes*. Society of Petroleum Engineers (SPE). 12-14 abril, Rio de Janeiro, 2010.

CUELHO, E.; MOKWA, R.; OBERT, K. *Comparative analysis of coarse surfacing aggregate using MICRO-DEVAL, L.A. abrasion and sodium sulfate soundness tests*. FHWA/MT-06-016/8117-27. Relatório de pesquisa. 2007.

CUNHA, M. B. *Avaliação do método Bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas*. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2004.

CUNHA, M. C. et al. *Influência dos agregados sobre propriedades mecânicas e volumétricas de misturas asfálticas: análise do método Bailey*. 18. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET, 2004.

DIAB, A.; ENIEB, M. Investigating influence of mineral filler at asphalt mixture and mastic scales. *International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 11, p. 213-224, 2018.

_____.; SINGH, D.; PAIS, J. C. *Moisture susceptibility of asphalt mixes: a literature review*. Conference. 4th Conference of Transportation Research Group of India (CTRG). Índia. 2017.

DIÓGENES, D. F. *Avaliação das propriedades de forma de agregados utilizados em lastro ferroviário a partir do uso do processamento digital de imagens*. Dissertação de mestrado. UFC, Fortaleza, CE, Brasil, 2016.

DIÓGENES, L. M. *Avaliação da influência do processo produtivo de agregados nas suas propriedades de forma utilizando o processamento digital de imagens*. TCC, graduação em Engenharia Civil. UFC. 2015.

_____. *Avaliação das relações entre propriedades de agregados minerais com base nas características do processo de britagem e da rocha de origem*. Dissertação de mestrado. UFC, Fortaleza, CE, Brasil, 2018.

_____. et al. The influence of stone crushing processes on aggregate shape properties. *Road Materials and Pavement Design*, v. 20, n. 4, 2019.

_____.; BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F. Análise das alterações das propriedades de forma de agregados ao longo do processo de britagem. 30. Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), Rio de Janeiro, 2016.

_____. et al. The influence of stone crushing processes on aggregate shape properties. *Road Materials and Pavement Design*, v. 1, p. 1-18, 2018.

DER/PR – DER/PR ES-P 15/17. *Pavimentação: concreto asfáltico usinado a quente com asfalto polímero. Especificação de serviço.* 2017.

DER/PR. *Manual de instruções ambientais para obras rodoviárias.* 2000.

DER/PR. *Guia para licenciamento ambiental de empreendimentos rodoviários.* 2016.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Pesquisa de viabilidade de implantação da fábrica de argila expandida na região amazônica – relatório final.* Instituto de Pesquisas Rodoviárias – Divisão de Pesquisa. Rio de Janeiro, 1981.

DNER-ME 035. *Agregados – determinação da abrasão "Los Angeles".* Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1998.

DNER-ME 054. *Equivalente de areia.* Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1997.

DNER-ME 078. *Agregado graúdo – adesividade a ligantes betuminosos.* Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 085. *Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real.* Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT 006-IE. *Materiais rochosos usados em rodovias – análise petrográfica – instrução de ensaio.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro (em revisão), 1994.

DNIT 086-ME. *Pavimentação – agregado – determinação do índice de forma – método de ensaio.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2020.

DNIT 134-ME. *Pavimentação – solos – determinação do módulo de resiliência – método de ensaio.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2018.

DNIT 135-ME. *Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação do módulo de resiliência – método de ensaio.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2018.

DNIT 136-ME. *Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação da resistência à tração por compressão diametral – método de ensaio.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2018.

DNIT 140-ES. *Pavimentação – sub-base de solo melhorada com cimento – especificação de serviço.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro (em revisão), 2010.

DNIT 142-ES. *Pavimentação – base de solo melhorada com cimento – especificação de serviço.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro. (em revisão), 2010.

DNIT 143-ES. *Pavimentação – base de solo-cimento – especificação de serviço.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro. (em revisão), 2010.

DNIT 178-PRO. *Pavimentação asfáltica – preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – procedimento.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2018.

DNIT 179-IE. *Pavimentação – solos – determinação da deformação permanente – instrução de ensaio.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2018.

DNIT 180-ME. *Pavimentação – misturas asfálticas – determinação do dano por umidade induzida – método de ensaio.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2018.

DNIT 181-ME. *Pavimentação – material estabilizado quimicamente – determinação do módulo de resiliência – método de ensaio.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2018.

DNIT 183-ME. *Pavimentação asfáltica – ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – método de ensaio.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2018.

DNIT 184-ME. *Pavimentação – misturas asfálticas – ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – método de ensaio.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2018.

DNIT 384-ME. *Pavimentação – misturas asfálticas – estabilidade ao armazenamento de asfalto polímero – método de ensaio.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (em revisão), 1999.

DNIT 411-ME. *Pavimentação – misturas asfálticas – massa específica, massa específica relativa (densidade) e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – método de ensaio.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2019.

DNIT 412-ME. *Pavimentação – misturas asfálticas – análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – método de ensaio.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2019.

DNIT 413-ME. *Pavimentação – misturas asfálticas – massa específica, massa específica relativa (densidade) e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – método de ensaio.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2019.

DNIT 414-ME. *Pavimentação – solo-cimento – dosagem físico-química de solo-cimento – método de ensaio.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2019.

DNIT 415-ME. *Pavimentação – mistura asfáltica – teor de vazios de agregados miúdos não compactados – método de ensaio.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2019.

DNIT 416-ME. *Pavimentação – misturas asfálticas – determinação do módulo dinâmico – método de ensaio.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2019.

DNIT 417-ME. *Pavimentação – solos – controle de compactação com densímetro eletromagnético – método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2019.

DNIT 419-ME. *Pavimentação – solo-cal – estimativa do teor de cal para estabilização química de solo – método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2019.

DNIT 420-ES. *Pavimentação – solo-cal – adição de cal para estabilização de camada de base*. Especificação de serviço. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2019.

DNIT 421-ES. *Pavimentação – solo-cal – adição de cal para estabilização de camada de sub-base*. Especificação de serviço. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2019.

DNIT 422-ES. *Pavimentação – solo-cal – adição de cal para melhoria de subleito*. Especificação de serviço. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2019.

DNIT 423-ME. *Pavimentação – ligante asfáltico – fluência e recuperação de ligante asfáltico determinadas a tensões múltiplas (MSCR) – método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2020.

DNIT 424-ME. *Pavimentação – agregado – determinação do índice de forma com crivos – método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2020.

DNIT 425-ME. *Pavimentação – agregado – índice de forma com paquímetro – método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2020.

DNIT 426-IE. *Pavimentação – mistura asfáltica – determinação dos parâmetros CDI e TDI – instrução de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2020.

DNIT 427-ME. *Pavimentação – misturas asfálticas – determinação da densidade máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2020.

DNIT 428-ME. *Pavimentação – misturas asfálticas – determinação da densidade aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados – método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2020.

DNIT 431/2020. *Pavimentação – misturas asfálticas – densidade in situ usando densímetro não nuclear – método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2020.

DNIT 432/2020. *Pavimentação – agregado – determinação das propriedades de forma por meio de processamento digital de imagens (PDI) – método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2020.

DNIT XXX-PRO. *Pavimentação – misturas asfálticas – método Bailey – análise da granulometria de agregados para concreto asfáltico denso – procedimento*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2020.

DNIT XXX-ME. *Pavimentação – ligante asfáltico – avaliação da tolerância ao dano de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS) – método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 20XX.

DNIT XXX-PRO. *Pavimentação – levantamento de defeitos para cálculo de área trincada de pavimento flexível – procedimento*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 20XX.

DNIT 430/2020. *Pavimentação – agregado – percentual de partículas fraturadas – método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2020.

DNIT XXX-PRO. *Pavimentação – levantamento do perfil longitudinal de pavimentos com perfilômetro inercial – procedimento*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 20XX.

DNIT 429/2020. *Pavimentação – agregado – porcentagem de partículas chatas e alongadas – método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2020.

DUMKE, M. P. *Concreto asfáltico drenante com fibras de celulose, ligante modificado por polímero e asfalto-borracha*. Dissertação. UFSC. 2005.

EMPRESA LATINO-AMERICANA DE CONSULTORIA VIÁRIA (E-VIAS). Avaliação de desempenho de pavimento flexível sob a ação simultânea do tráfego e da água, em temperatura elevada: deformação permanente. *Hamburg Wheel-Track Device – HWTD MÉTODO AASHTO T-324*.

FABRÍCIO, J. M. Desenvolvimento da usina protótipo móvel para fabricação de agregados de argila. 21. Reunião Anual de Pavimentação (Salvador-BA). *Anais*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, v. 1, p. 150-188, 1986.

FACCIN, C. *Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande do Sul; comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente*. Dissertação. UFSM. 2018.

FAHEEN, A. et al. Effect of mineral filler on damage resistance characteristics of asphalt binders. *AAPT Proceedings*. 2008.

FERNANDES, P. R. N. *Caracterização de ligante asfáltico brasileiro e avaliação da presença de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs)*. Dissertação de mestrado em Química Inorgânica. UFC, Fortaleza, 2007.

FERREIRA, J. L. S. *Melhoramento da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas pela escolha granulométrica a partir da metodologia da Faixa de Agregados Dominantes*. Projeto de graduação. UFC. 2015.

_____; BASTOS, J. S.; SOARES, J. B. Validação da metodologia de Faixa de Agregados Dominantes para avaliação e especificação da granulometria de misturas asfálticas densas. In: 29. Congresso Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes, Ouro Preto, MG, 2015.

_____; SOARES, J. B.; BASTOS, J. S. Métodos de seleção granulométrica com foco na resistência à deformação permanente. *Transportes*, v. 24, n. 2. p. 46-52, 2016.

FONTENELE, P. V. G. Avaliação da exposição ao material particulado respirável em serviços de pavimentação na Região Metropolitana de Fortaleza. Monografia, graduação em Engenharia de Transportes. UFCeará, Fortaleza, 2015.

_____ et al. Avaliação da exposição e risco de câncer em trabalhadores da pavimentação: um estudo baseado nos níveis de partículas respiráveis presentes nos fumos de asfalto. *Transportes*, v. 26, n. 2, p. 55-69, 2018.

FREIRE, R. A. *Avaliação da resistência ao trincamento de misturas asfálticas finas com diferentes tamanhos máximos nominais*. Dissertação. UFC. 2015.

_____ et al. Aggregate maximum nominal sizes: influence on fatigue damage performance using different scales. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 1, p. 04017067, 2017.

_____; CASTELO BRANCO, V. T. F; VASCONCELOS, K. L. Avaliação da resistência ao trincamento de misturas asfálticas compostas por agregados miúdos com diferentes tamanhos máximos nominais. *Transportes*, v. 22, p. 117, 2014.

FREITAS, J. B. *Análise de parâmetros para projeto mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos em Goiás*. Dissertação. UFG. 2019.

FREITAS, F. N. R.; FERREIRA, W. L. G.; CASTELO BRANCO, V. T. F. Avaliação da relação entre o dano por umidade e a permeabilidade de misturas asfálticas contendo cinza volante como fíler. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 11, p. 18-29, 2019.

FREITAS, H. B. *Misturas asfálticas de módulo elevado com uso de escória de aciaria como agregado*. Dissertação. UFRJ. 2007.

_____; MOTTA, L. M. G. Uso de escória de aciaria em misturas asfálticas de módulo elevado. *Transportes*, v. 16, n. 2, p. 5-12, 2008.

FRITZEN, M. A.; MOTTA, L. M. G. *Análise do desempenho do asfalto borracha faixa gap-graded Caltrans em pista experimental através de ensaios acelerados com a utilização do simulador de tráfego móvel*. 36. Reunião Anual de Pavimentação, Curitiba - PR. 2005.

_____; _____. *Resultados obtidos dos trechos experimentais estudados com simulador de tráfego na rodovia Rio-Teresópolis após 18 meses de abertura ao tráfego*. 37. Reunião Anual de Pavimentação e 11. Enacor – Os caminhos da integração, Rio de Janeiro. 2006.

_____ et al. Comportamento mecânico de algumas misturas asfálticas com dois tipos de asfalto e diferentes teores de ligante, com ênfase na fadiga. *Revista Pavimentação*, v. 12, p. 29-43, 2008.

_____ et al. *Comportamento de misturas asfálticas mornas submetidas a ensaios acelerados por simulador de tráfego*. In: Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projeto de Reforço, Fortaleza. 2009.

_____ et al. Comportamento de misturas mornas por processo de espumação em diferentes temperaturas de usinagem e compactação. *Revista Estradas*, v. 11, p. 32-41, 2012.

FLÔRA, C. S. D. *Comportamento mecânico de duas misturas asfálticas com o uso de um aditivo surfactante de mistura morna*. Dissertação. Coppe/UFRJ. 2018.

FURLAN, A. P. et al. *Algumas considerações acerca de ensaios para avaliação do dano por umidade em misturas asfálticas densas*. 35. RAPv. ABPv. 2004.

_____. *Considerações acerca da adesão e da susceptibilidade à umidade de misturas asfálticas densas à luz de algumas propriedades mecânicas*. Tese. USP-SC. 2006.

GAIA FERREIRA, W. L.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; VASCONCELOS, K. L. *Avaliação da relação entre a ativação do ligante asfáltico do material fresado e suas propriedades de forma*. In: 20. CILA – Congreso Ibero Latinoamericano Del Asfalto, Guadalajara. 2019.

GASPAR, M. S. et al. Procedimento de extração em etapas para avaliação da interação entre ligantes na reciclagem a quente e morna. 19. CILA – Congreso Ibero Latinoamericano de Asfalto, Medellin. 2017.

_____. *Mecanismos de ativação e interação entre ligantes na reciclagem asfáltica quente e morna de misturas asfálticas*. Dissertação. Universidade de São Paulo. 2019.

_____ et al. *Caracterização do material fresado e quantificação da ativação do ligante para produção de misturas asfálticas recicladas*. 20. CILA – Congreso Ibero Latinoamericano Del Asfalto, Guadalajara. 2019.

GENESSEAU, M. M. L. *Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material fresado*. Tese. USP. 2015.

GONÇALVES, F. J. P.; CERATTI, J. A. P.; BERNUCCI, L. B. *Study of permanent deformations in asphalt concrete layers*. In: 4. European symposium performance of bituminous and hydraulic materials in pavements, Nottingham, 2002.

GOUVEIA, L. T. *Avaliação do ensaio de angularidade do agregado fino (FAA) da especificação Superpave*. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP. 2002.

_____ et al. *Considerações acerca da absorção de asfalto pelos agregados e sua influência na suscetibilidade à umidade*. 18. ANPET. 2004.

_____. *Contribuições ao estudo da influência de propriedades de agregados no comportamento de misturas asfálticas densas*. Tese de doutorado. USP – EESC, São Carlos, SP. 2006.

_____; FERNANDES JR., J. L. *Considerações a respeito das propriedades de consenso do Superpave para agregados de misturas asfálticas*. ANPET. 2006.

GOUVEIA, B. C. S.; BASTOS, J. B. S.; SOARES, J. B. *Contribuições quanto à resistência à deformação permanente de misturas asfálticas*. 45. Reunião Anual de Pavimentação, Brasília, DF, 2016.

GUATIMOSIM, F. V. *Estudo do desempenho estrutural de camadas de pavimento recicladas com espuma de asfalto*. Dissertação. USP. 2015.

GUIMARÃES, J. R. P. de F. *Riscos para a saúde de trabalhadores de pavimentação de ruas: as emissões tóxicas do asfalto*. *CIPA Publicações*, São Paulo, v. 26, n. 304, p. 54-56, 2004.

GUIMARÃES, A. C. R.; MOTTA, L. M. G. *Execução de revestimento asfáltico com agregado de laterita lavada no Acre*. Anais do 15. Encontro do Asfalto do Instituto Brasileiro do Petróleo e Gás (IBP). Rio de Janeiro, dezembro de 2000.

_____; MOTTA, L. M. G.; ANTONELLO, L. L. *Um estudo sobre a viabilidade de utilização de metadolomitos do Paraná em camadas de pavimentos*. Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro. 40. RAPv-ABPv. 2010.

_____; _____. ODA, S. *Influência do tipo de ligante no comportamento resiliente de concreto asfáltico contendo agregados de laterita lavada*. 40. RAPv – Reunião Anual de Pavimentação ABPv. Rio de Janeiro. 2010.

_____. *Projeto IME/Petrobras: estudos de misturas asfálticas contendo agregados alternativos através do monitoramento de trechos experimentais*. Relatório de atividades relativas ao período de 5/2010 a 2/2012. 2012.

HABEEB, H.; CHANDRA, S.; NASHAAT, Y. *Estimation of moisture damage and permanent deformation in asphalt mixture from aggregate gradation*. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 18, n. 6, p. 1655-1663, 2014.

IBIAPINA, D. S. *Avaliação do efeito da mineralogia de agregados nas propriedades mecânicas e funcionais de misturas asfálticas*. Dissertação. UFC. 2014.

_____ et al. *Avaliação da relação entre angularidade de agregados e parâmetros do esqueleto mineral das misturas asfálticas*. 19. CILA. Congreso Ibero Latinoamericano de Asfalto, Medellin, Colômbia. 2017.

_____. *Proposição de um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados caracterizados com o uso do processamento digital de imagens para a seleção de materiais brasileiros*. Tese. UFC. 2018.

_____; CASTELO BRANCO, V. T. F.; MOTTA, L. M. G. *Avaliação do impacto da mudança das propriedades de forma de agregados na formação do esqueleto mineral de misturas asfálticas*. 32. Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), Gramado. 2018.

_____ et al. Proposição de um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados caracterizados com o uso do processamento digital de imagens a partir de materiais oriundos do Brasil. *Transportes*, v. 26, p. 116-128, 2018.

_____ et al. Análise estatística da qualidade das medidas das propriedades de forma de agregados com o uso do processamento digital de imagens (PDI). *Transportes*, v. 28, p. 99-110, 2020.

JAHROMI, S. G. Investigation of damage and deterioration hazard in asphalt mixtures due to moisture. *ICE – Transport*, v. 171, issue TR 2.

KIM, S. *Identification and assessment of the dominant aggregate size range (DASR) of asphalt mixtures*. Tese. Universidade da Flórida. 2006.

KIM, Y. R.; SOUZA, L. T. *Effects of aggregate angularity on mix design characteristics and pavement performance*. Report on Research n. MPM-10. Mid-America Transportation Center and University of Nebraska-Lincoln. 2009.

KUCHIISHI, A. K. et al. *Influência das granulometrias nas propriedades mecânicas de misturas recicladas a frio estabilizadas com emulsão asfáltica e cimento Portland*. 19. CILA – Congresso Ibero Latinoamericano de Asfalto, Medellin. 2017.

_____; VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. L. B. Effect of mixture composition on the mechanical behavior of cold recycled asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 20, p. 1-11, 2019.

LEITE, L. M. F.; MOTTA, L. M. G. *O efeito do filer nas características do ligante asfáltico*. Anpet. 2002.

LIBERATORI, L. A.; CONSTANTINO, R. S. *Melhoradores de adesividade para misturas asfálticas – estado da arte*. IBP. 18. Encontro de Asfalto. 2006.

LOPES, M. M. *Programa interlaboratorial de agregados e misturas asfálticas da rede asfalto N/NE*. Dissertação. UFC. 2010.

LOURES, R. C. B. A. *Estudo de pré-misturado a frio contendo escória de aciaria*. Dissertação. IME. 2017.

LUCAS JR., J. L. O.; BABADOPULOS, L. A. L.; SOARES, J. B. Aggregate – binder adhesiveness assessment and investigation of the influence of morphological and physic-chemical properties of mineral aggregate. *Road Materials Pavement Design*, p. 1-16, 2019.

_____; _____. Moisture-induced damage resistance, stiffness and fatigue life of asphalt mixtures with different aggregate-binder adhesion properties. *Construction and Building Material*, n. 216, p. 166-175, 2019.

_____; _____. Effect of aggregate shape properties and binder's adhesiveness to aggregate on results of compression and tension/compression tests on hot mix asphalt. *Materials and Structures*, v. 53, 2020.

MACÊDO, J. A. G.; BRASILEIRO, F. E. Características físicas e mecânicas de agregados graúdos lateríticos, após extração em concretos betuminosos usinados a quente. 22. RAPv. ABPv, v. 1, p. 23037, 1987.

_____. *Estudo comparativo das características físicas e mecânicas de agregados graúdos convencional e não convencionais visando suas aplicações em concreto betuminoso usinado a quente*. Dissertação. UFPB. 1989.

MAIA, R. S. et al. *Avaliação do impacto da utilização de revestimentos do tipo camada porosa de atrito (CPA) no desempenho da segurança viária (DSV) em meio urbano*. 33. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (Anpet). 2019.

_____; CASTELO BRANCO, V. T. F. *Consideração da textura superficial avaliada a partir do processamento digital de imagens (PDI) na seleção de agregados minerais para uso em revestimentos asfálticos*. 33. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (Anpet). 2019.

MAGALHÃES, S. T. *Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho*. Dissertação. Coppe/UFRJ. 2004.

MENDES, L. O. *Utilização do método Bailey para a seleção de agregados em dosagem de misturas asfálticas*. Dissertação. UFJF. 2011.

MODESTO, F. B. F. et al. *Potencialidade da utilização de argila calcinada como agregado graúdo para fins de pavimentação*. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. 2008.

MOMM, L. *Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico*. Tese. USP. 1998.

MORILHA, A. *Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos CAPs e nas propriedades mecânicas e fadiga de misturas asfálticas*. Tese M. Sc. UFSC, Florianópolis, SC. 2004.

MOTTA, L. M. G.; LEITE, L. F. M. *Efeito do filer nas características mecânicas das misturas asfálticas*. 11. Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte (Anpet), Gramado, RS. 2000.

_____ et al. *Avaliação do comportamento de dois tipos de revestimentos asfálticos dosados pelo método Superpave sob ação de tráfego real na rodovia BR040 – trecho concessionária Concer*. Disponível em: <www.antt.gov.br>. 2012.

MOTTA, R. S. *Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético*. Tese de doutorado em Engenharia de Transportes. USP, São Paulo. 2011.

MOURA, E. *Estudo do efeito de aditivos químicos e da cal como melhoradores de adesividade em misturas asfálticas densas*. Dissertação. USP. 2001.

_____. *Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório*. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da USP, São Paulo. 2010.

MOURÃO, F. A. L. *Misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA*. Dissertação. Coppe/UFRJ. 2003.

MUNIANDY, R.; ABURKABA, E. E. Effect of filler type and particle size on moisture susceptibility of stone matrix asphalt mixtures. *Australian Journal of Basic and Applied Science*, v. 4, n. 11, p. 5522-5532, 2010.

NASCIMENTO, F. A. C.; GUIMARÃES, A. C. R.; CARNEIRO, L. A. *Análise da influência das propriedades do ligante asfáltico e do esqueleto pétreo na deformação permanente de misturas asfálticas*. 44. RAPv – Reunião Anual de Pavimentação. Foz do Iguaçu, PR, 2015.

NASCIMENTO, L. A. H. *Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente*. Dissertação de mestrado. Coppe/UFRJ. Dezembro, 2008.

NASCIMENTO, R. R.; MOTTA, L. M. G. *Utilização de solos lateríticos e agregados de argila calcinada em pavimentação alternativa no estado do Acre*. 13. Cobramseg/3. CLBG/4. SBMR. SP: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos (ABMS), 2006.

NATAADMADJA, A. D. et al. *Assessing the moisture susceptibility of aggregates with Los Angeles abrasion test*. AIP Conference Proceedings, 2017.

NCHRP. *Report 531*. Relationship on air voids, lift thickness and permeability in hot-mix asphalt pavements. The National Academies Press. 2004.

NEJAD, F. M.; AFLAKI, E.; MOHAMMADI, M. A. Fatigue behavior of SMA and HMA mixtures. *Construction and Building Materials*, n. 24, p. 1158-1165, 2010.

NEUBAUER, A-C. *The effect of petrographic composition of railway ballast on the Los Angeles test*. Dissertation. Institute of Applied Geosciences. Graz University of Technology. Áustria. 2014.

NEVES FILHO, A. S.; PINTO, S.; CARNEIRO, L. A. V. *Influência da adição de dopes na adesividade em misturas asfálticas a quente*. 38. RAPv. 2007.

NOGUEIRA, M. G. *Comparação do comportamento em campo de concretos asfálticos com CAP 30-45 e com CAP 50-70 para revestimentos de pavimentos*. Dissertação, Poli/USP, São Paulo. 2008.

NÚÑEZ, W. P. et al. Um estudo experimental sobre os afundamentos nas trilhas de rodas de pavimentos delgados com basaltos alterados. *Transportes*, v. 7, n. 1, p. 10-29, 1999.

ODA, S. et al. *Estudo comparativo do comportamento de fadiga de misturas betuminosas com diferentes teores de asfalto*. Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, 2009, Florianópolis. 6. CBR&C. São Paulo: ABCR.

OLIVEIRA, J. A. *Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas mornas*. Dissertação. UFC. 2013.

ONOFRE, F. C. et al. Correlação entre variáveis de densificação do compactador giratório e resistência à deformação permanente de misturas asfálticas convencionais e com resíduos. *Transportes*, v. 19, p. 2237-1346, 2011.

_____. *Avaliação do comportamento mecânico em misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos modificados por ácido polifosfórico e aditivos poliméricos enfatizando a resistência à deformação permanente*. UFC. 2012.

OTAVIANO, F. C. M. *Influência da curva granulométrica no comportamento da mistura asfáltica*. Trabalho de conclusão do curso de pós-graduação lato sensu em Engenharia Geotécnica. Unisuam. 2017.

OTTO, G. G. *Misturas asfálticas mornas – verificação da fadiga e do módulo complexo*.

PAN, T.; TUTUMLUER, E.; CARPENTER, S. H. Effect of coarse aggregate morphology on permanent deformation behavior of hot mix asphalt. *Journal of Transportation Engineering*, p. 580-589, 2006.

PAZOS, A. G. *Efeito de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas*. Dissertação. Coppe/UFRJ. 2015.

PEREIRA, S. L. O. *Avaliação dos tratamentos superficiais simples, duplo e triplo de rodovias através do emprego de diferentes agregados da Região Metropolitana de Fortaleza*. Dissertação. UFC. 2013.

PINILLA, A. *O sistema filler-betume: algumas considerações sobre sua importância nas misturas densas – 125 GTPv 65-14 Conselho Nacional de Pesquisas – Instituto de Pesquisas Rodoviárias*. 1965.

PINTO NETTO, Q. U. E. M.; GUIMARÃES, A. C. R. Caracterização laboratorial de resíduos de mineração como agregado alternativo para misturas asfálticas. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v. 9, n. 5, p. 88-98. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2018.005.0009. 2018.

PINTO, P. H. F. *Desenvolvimento de rotas para cominuição de itabiritos compactados do quadrilátero ferrífero*. São Paulo. 2016.

PINTO, S. *Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos*. Tese. Coppe/UFRJ. 1991.

POLIVANOV, H. et al. Argilas calcinadas para uso em pavimentos rodoviários. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA)*, v. 4, p. 33-46, 2014.

POSSEBON, E. P. *Estudo laboratorial das propriedades mecânicas de misturas com diferentes cimentos asfálticos de petróleo produzidos no Brasil*. Dissertação. UFSM. 2018.

PRIYANTHA, W.; JAYAWICKRAMA, S. H.; HOARE, A. R. Long-term research on bituminous coarse aggregate: use of Micro-Deval test for project level aggregate quality control. FHWA/TX-06/0-1707-9. *Technical Report*: 2007.

RAUL, C. M. et al. *Avaliação de um aditivo rejuvenescedor em uma combinação de ligante envelhecido e ligante altamente modificado*. 19. CILA – Congresso Ibero Latinoamericano de Asfalto, Medellín. 2017.

_____. *Avaliação a nível de ligantes da aplicabilidade de material fresado na execução de misturas asfálticas antirreflexão de trincas*. Dissertação. USP. 2019.

REIS, R. M. M. *Revestimento asfáltico tipo SMA para alto desempenho em vias de tráfego pesado*. Dissertação. USP. 2002.

RIBEIRO FILHO, A A. et al. *Utilização de fileres alternativos para fabricação de concreto betuminoso usinado a quente*. 33. Reunião Anual de Pavimentação. ABPv. Florianópolis. 2001.

ROCHA SEGUNDO, I. G.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; VASCONCELOS, K. L. *Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado*. 9. Congresso Brasileiro de Concessões & Rodovias. 2015.

_____ et al. Misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado. *Transportes*, v. 24, p. 85, 2016.

_____ et al. *Incorporation of steel slag and reclaimed asphalt into surface layer*. Wastes: Solutions, Treatments and Opportunities III, Lisboa, 2019.

ROCHA, F. L. L. *Utilização de agregado siderúrgico (escória de aciaria) em revestimento asfáltico tipo tratamento superficial*. Dissertação de mestrado em Engenharia de Minas. UFOP. 2011.

RODRIGUES, A. C. *Avaliação da influência da granulometria de misturas asfálticas na aderência pneu-pavimento*. Dissertação de mestrado. UFC. Novembro, 2013.

- ROHDE, L. *Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – estudo laboratorial*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. UFRGS. 2002.
- ROSSATO, F. P. *Avaliação do fenômeno da fadiga e das propriedades elásticas de misturas asfálticas com diferentes ligantes em variadas temperaturas*. Dissertação. UFSM. 2005.
- SÁ, M. F. P. *Contribuição ao estudo da influência do tráfego na infraestrutura viária com misturas asfálticas para corredores de ônibus*. Tese. Coppe/UFRJ. 2003.
- SALLA, R. L.; LUVISÃO, G. Incorporação de resíduo de areia de fundição em misturas asfálticas usinadas a quente: avaliação dos componentes presentes na água de solubilização e no comportamento mecânico. *Unoesc e Ciência Acet*, v. 10, n. 1, 2019.
- SANTANA, H. *Considerações sobre os nebulosos conceitos e definições de filer em misturas asfálticas*. 29. Reunião Anual da Pavimentação, Cuiabá, ABPv. 1995.
- SANTOS, M. G. R. *Estudo do comportamento de agregado sintético de argila calcinada para uso em revestimentos asfálticos para Manaus*. Dissertação. UnB, Brasília, DF, 2007.
- SANTOS, R. P. *Influência dos cânions urbanos, tráfego veicular e variáveis meteorológicas na concentração de NO₂ em área com intenso processo de verticalização (Fortaleza – CE)*. Monografia. Graduação em Ciências Ambientais. UFC, Fortaleza, 2018.
- SANTOS, F. S. et al. Avaliação da influência das condições meteorológicas na concentração de material particulado fino (MP_{2,5}) em Belo Horizonte, MG. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 24, n. 2, Mar./Apr. 2019.
- SCHUMACHER, A. G. et al. Expansion level of steel slag aggregate effects on both material properties and asphalt mixture performance. *Transportation Research Record*, 2019.
- SCHUSTER, S. L. *Estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas aplicadas em campo por meio da teoria viscoelástica de dano contínuo*. Dissertação. UFSM. 2018.
- SHUANG, C. et al. Durability of asphalt mixtures: effect of aggregate type and adhesion promoters. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, n. 54, p. 100-111, 2014.
- SILVA, A. H. M. *Avaliação do comportamento de pavimentos com camada reciclada de revestimentos asfálticos a frio com emulsão modificada com polímero*. Dissertação. USP. 2011.
- SILVA, C. N. P. *Um estudo sobre a viabilidade da utilização de escória de aciaria LD em camadas de pavimentos*. Dissertação. IME. 2013.
- SILVA, P. B. *Estudo em laboratório e em campo de misturas asfálticas SMA 0/8S*. Dissertação. USP. 2005.

SILVA, R. G. O.; FERNANDES, G. Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com escória de aciaria e resíduos industriais de minério de ferro. *Revista Pavimentação*, v. 8, p. 44-52. 2013.

_____. *Caracterização de concreto asfáltico elaborado com rejeitos de minério de ferro do quadrilátero ferrífero*. UFOP. 2017.

SILVA, V. D.; VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. L. B. Deformabilidade de misturas recicladas estabilizadas com ligante asfáltico. *Revista Estradas*, v. 22, p. 87-90, 2017.

_____. *Deformabilidade de misturas recicladas estabilizadas com ligante asfáltico*. Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2019.

SOARES, J. S. *Investigação da relação entre parâmetros da compactação giratória e de deformação permanente em misturas asfálticas densas*. Dissertação. USP, São Carlos, SP, 2014.

SOARES, J. B. et al. *Propriedades mecânicas de misturas asfálticas com variação de granulometria e de CAP*. 15. Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

SOUZA, C. D. R.; D'AGOSTO, M. A. Análise dos custos logísticos aplicada à cadeia logística reversa do pneu inservível. *Transportes*, v. 21, n. 2, 2013. ISSN: 2237-1346 (online). DOI: 10.4237/transportes.v21i2.649.

SOUZA, J. B. Q.; MOTTA, L. M. G. *Comportamento de misturas asfálticas a quente com agregados provenientes de jazidas de seixo no estado do Pará*. Reunião Anual de Pavimentação – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, 2008.

SOUZA, J. C. Reciclagem e sustentabilidade ambiental: a importância dos processos logísticos. *Transportes*, v. 19, n. 1, p. 43-48, 2011.

SOUZA, J. L. F. et al. *Comportamento de agregados graúdos em misturas betuminosas a quente no estado da Paraíba*. 37. Reunião Anual de Pavimentação, 2006, Goiânia. 37. RAPv e 11. Enacor.

SOUZA, T. D.; SILVA, B-H. A.; GUIMARÃES, A. C. R. Propriedades mecânicas de concretos asfálticos dosados com rejeitos do beneficiamento magnético a seco do minério de ferro. *Transportes*, v. 21, 2020.

SPECHT, L. P. *Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus*. Tese. UFRGS. 2004.

SUZUKI, K. Y.; KLINSKY, L. M. G.; VASCONCELOS, K. L. Resistência à tração e dano por umidade induzida de misturas asfálticas recicladas. 21. Reunião de Pavimentação Urbana (RPU), São Paulo, 2018.

_____ et al. Adaptações em usinas de Asfalto para Reciclagem a Quente ou Morna de Material Fresado (RAP). *REVISTA ESTRADAS (PORTO ALEGRE)*, v. 23, p. 84, 2018.

_____; VASCONCELOS, K. L.; KLINSKY, L. M. G. *Hot recycling: maximizing the use of RAP with no additives*. In: Resilient road infrastructures, San Marino. Resilient Road Infrastructures, 2019.

_____. *Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado*. Dissertação. USP. 2019.

_____. *Avaliação de diferentes teores de fresado na produção de misturas recicladas a quente e morna*. Dissertação. USP. 2019.

TAVARES, D. S. *Avaliação laboratorial de mistura asfáltica do tipo SMA com agregado siderúrgico*. Dissertação. Coppe/UFRJ. 2012.

TINAJEROS, R. A. P. *Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente convencional e modificada com polímero*. Dissertação. UFV. 2016.

TONIAL, I. A. *Influência do envelhecimento do revestimento asfáltico na vida de fadiga de pavimentos*. Dissertação. Coppe/UFRJ. 2001.

TROTTA, R. P. C. *Quantificação da degradação mecânica e avaliação da heterogeneidade de agregados por processamento digital de imagem (PDI)*. Dissertação. Instituto de Geociências. Departamento de Geologia. UFRJ. 2020.

UHLIG, E. *Effect of grain shape and petrographic composition of railway ballast on the Impact Test*. Dissertação. Graz University of Technology. Áustria. 2014.

VALADARES, R. G.; GUIMARÃES, A. C. R. *Comportamento mecânico de areia – asfalto contendo resíduo: uma alternativa para pavimentos de baixo volume de tráfego*. Anais do 19. Congresso Ibero-Latino Americano do Asfalto. 2017.

VARGAS-NORDEBECK, A. V. et al. *Evaluating moisture susceptibility of asphalt concrete mixtures through simple performance tests*. TRB. 2015.

VASCONCELOS, K. L.; SOARES, J. B. *Projeto de misturas de concreto betuminoso reciclado a quente com diferentes teores de material fresado*. Anais do 12. Congresso Ibero-Latino Americano del Asfalto. 2003.

_____; _____. LEITE, L. M. *Influência da densidade máxima teórica na dosagem de misturas asfálticas*. In: Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Anpet, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

_____ et al. *Caracterização mecânica de misturas asfálticas contínuas e descontínuas com diferentes ligantes asfálticos*. 7. Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões – CBR&C. Foz do Iguaçu, PR, 2011.

VASCONCELOS, M. A. G. *Estudo sobre emprego do Cape Seal em revestimentos rodoviários do estado do Ceará*. Dissertação. UFC. 2013.

VAVRIK, W. R. *Asphalt mixture design concepts to develop aggregate interlock*. Thesis. University of Illinois, Urbana, Illinois, EUA. 2000.

_____; HUBER, G.; PINE, W. Bailey Method for gradation selection in HMA mixture design. Transportation Research Board: Transportation Research Circular Number E-C044, Washington, D. C., EUA. 2002.

VIANA, M. A. et al. *Trecho experimental/CE: monitoramento do pavimento que testa a aplicação da especificação Superpave na Região Nordeste*. In: 13. Encontro de Asfalto – IBP, Rio de Janeiro, RJ, 1996.

VIEIRA, A. Agregados de argila calcinada: uma alternativa para a pavimentação rodoviária na região amazônica. In: Reunião Anual de Pavimentação, 32. RAPv, Brasília. Anais. *Associação Brasileira de Pavimentação*, v. 1, p. 62-73, 2000.

WANG, W. et al. Surface free energy method for evaluating the effects of anti-stripping agents on the moisture damage to asphalt mixtures. *Journal of Adhesion Science and Technology*.

WESSELING, D. H. *Estudo do comportamento mecânico de misturas em concreto asfáltico com incorporação de resíduos industriais*. Dissertação. UFRGS. 2005.

WHITE, T. D.; HADDOCK, J. E.; RISMANJOTO, E. *NCHRP Report 557: Aggregate tests for hot-mix asphalt mixtures used in pavements*. NCHRP Report 557. Transportation Research Board. Washington, D.C., 2006.

WITCZAK, M. W.; KALOUSH, K.; PELLINEN, T. Simple performance test for Superpave mix design. National Cooperative Highway Research Program, *NCHRP Report 465*. 2002.

YASREEN, S. G.; MADZLAN, N. B.; IBRAHIM, K. The effect of fine aggregate properties on the fatigue behavior of the conventional and polymer modified bituminous mixtures using two types of sand as fine aggregate. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, v. 5, n. 10, 2011.

ZUBARAN, M. *Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto*. Dissertação. Coppe/UFRJ. 2015.

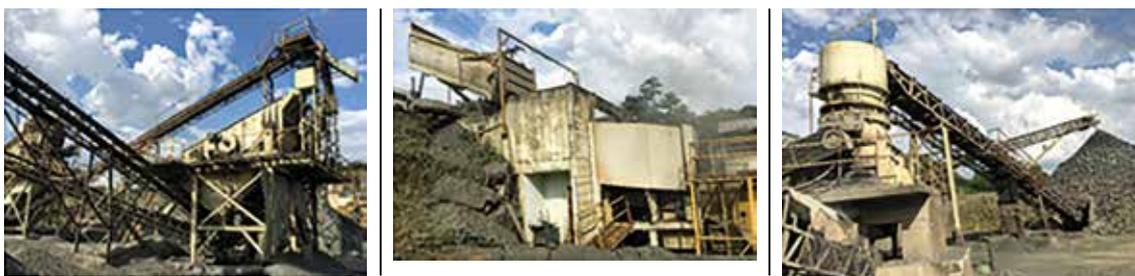
ANEXO 1 – FOTOS DE PEDREIRAS COM OBSERVAÇÕES

Figura A1.1 – Padrão colunar do basalto e o persistente diaclasamento observável no material fresco por toda a frente de lavra



Fonte: Trotta, 2020.

Figura A1.2 – Na ordem em que se encontram: peneira vibratória de separação granulométrica; britador primário de mandíbulas e britador cônico terciário



Fonte: Trotta, 2020.

Figura A1.3 – Panorama geral das seis bancadas da pedreira Calcário Cazanga no município de Arcos, Minas Gerais



Fonte: Trotta, 2020.

Figura A1.4 – Calcário



Fonte: Trotta, 2020.

Figura A1.5 – Bancadas inferiores ilustrando a coloração escura do metacalcário com estratificação horizontal bem preservada



Fonte: Acervo dos autores.

Figura A1.6 – Aspecto homogêneo refletindo a textura afanítica do metacalcário



Fonte: Acervo dos autores.

Figura A1.7 – Um dos testemunhos obtidos durante a investigação geológica na fase de exploração da região, ilustrando como as rochas podem ser heterogêneas



Fonte: Trotta, 2020.

Figura A1.8 – Feição de carstificação das porções superiores da pedreira. Essas feições materializam a dissolução meteórica a que os calcários são submetidos



Fonte: Trotta, 2020.

Figura A1.9 – Pedreira J. Serrão – Rio de Janeiro



Fonte: Trotta, 2020.

Figura A1.10 – Zona de falhas na bancada três das seis que compõem a mina de gnaiss migmatítico. É possível observar a heterogeneidade do maciço com veios de pegmatito e corpos granitoides geneticamente vinculados ao gnaiss parental (J. Serrão)



Fonte: Trotta, 2020.

Figura A1.11 – J. Serrão



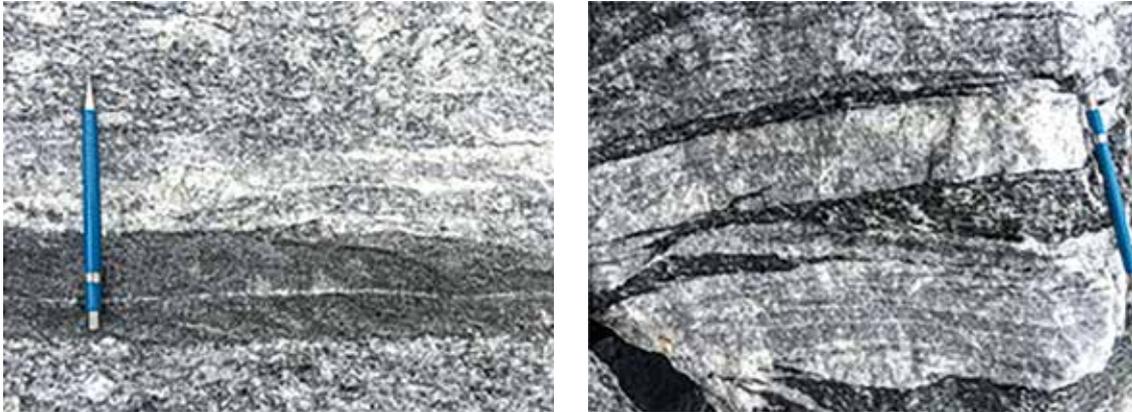
Fonte: Trotta, 2020.

Figura A1.12 – Migmatito. Melanossoma (fase escura), leucossoma (fase clara), paleossoma (fase cinza parental), pegmatito (fase grossa amarelada), granitoide (fase granítica fina)



Fonte: Trotta, 2020.

Figura A1.13 – Neossoma (leucossoma + melanossoma): tudo que foi gerado na fase de fusão da rocha após o metamorfismo



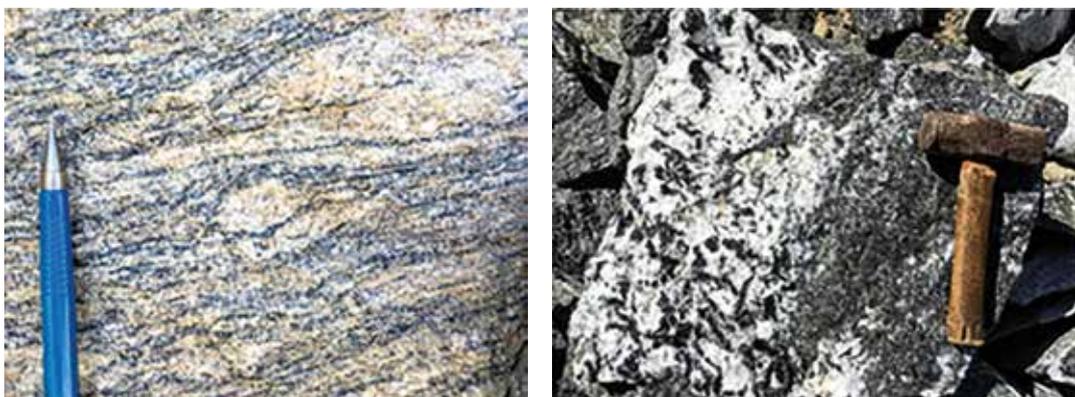
Fonte: Trotta, 2020.

Figura A1.14 – Pegmatito com texturas extremamente grossas, com cristais centimétricos



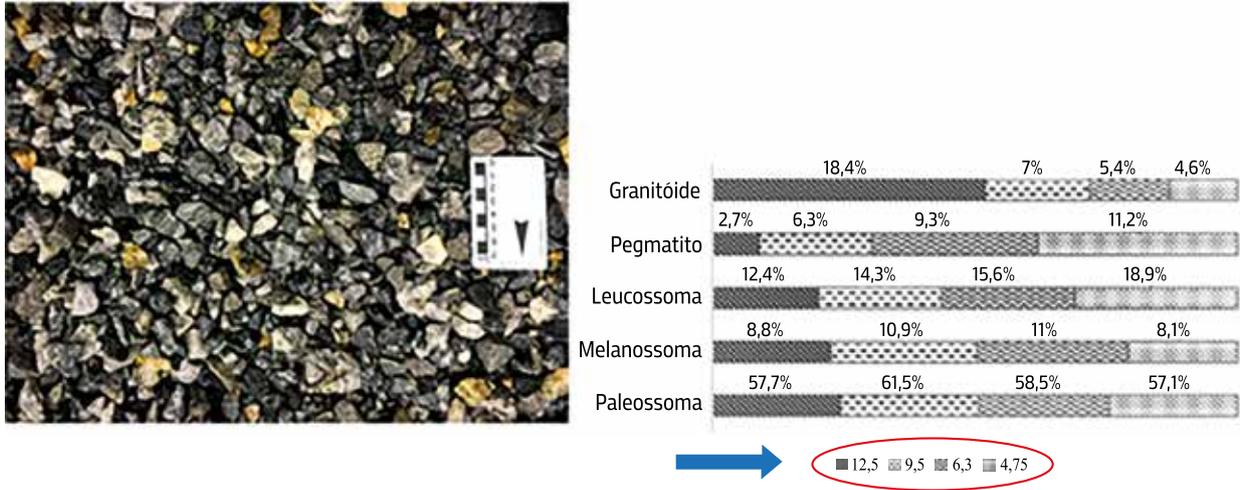
Fonte: Trotta, 2020.

Figura A1.15 – Contato pegmatito/leucossoma/melanossoma na imagem da esquerda e o paleossoma (parental) na imagem da direita



Fonte: Trotta, 2020.

Figura A1.16 – Heterogeneidade dos agregados resultante da configuração geológica observada na pedra migmatito



Fonte: Acervo dos autores.

Figura A1.17 – Fotos de pedreiras e britas em usinas



Fonte: Acervo dos autores.

Figura A1.18 – Pedreira Magé Mineração



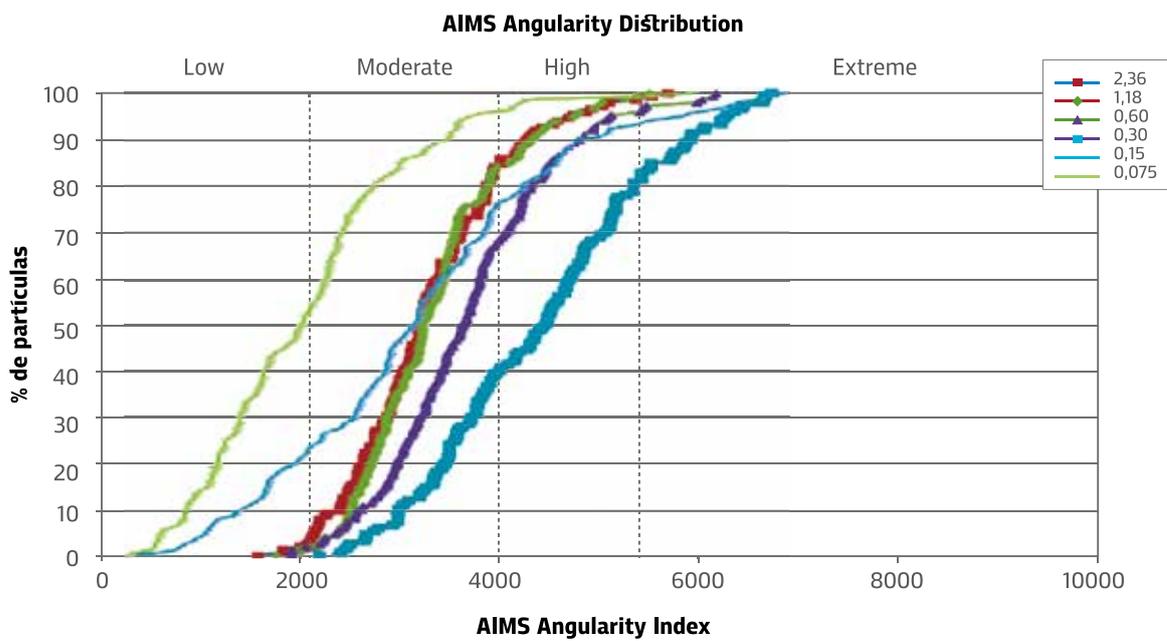
Fonte: Acervo dos autores.

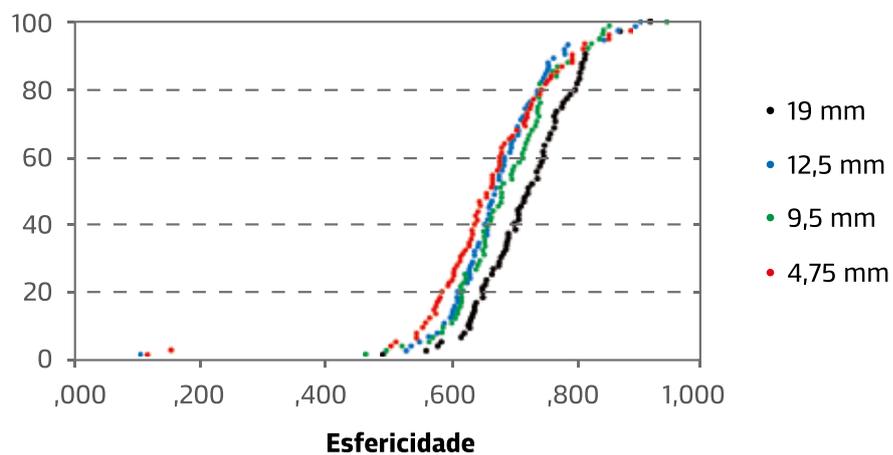
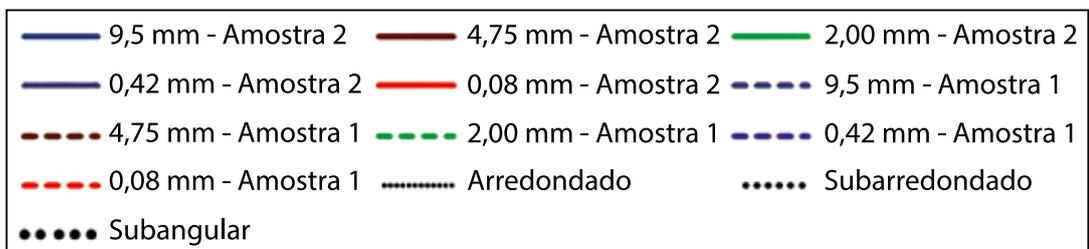
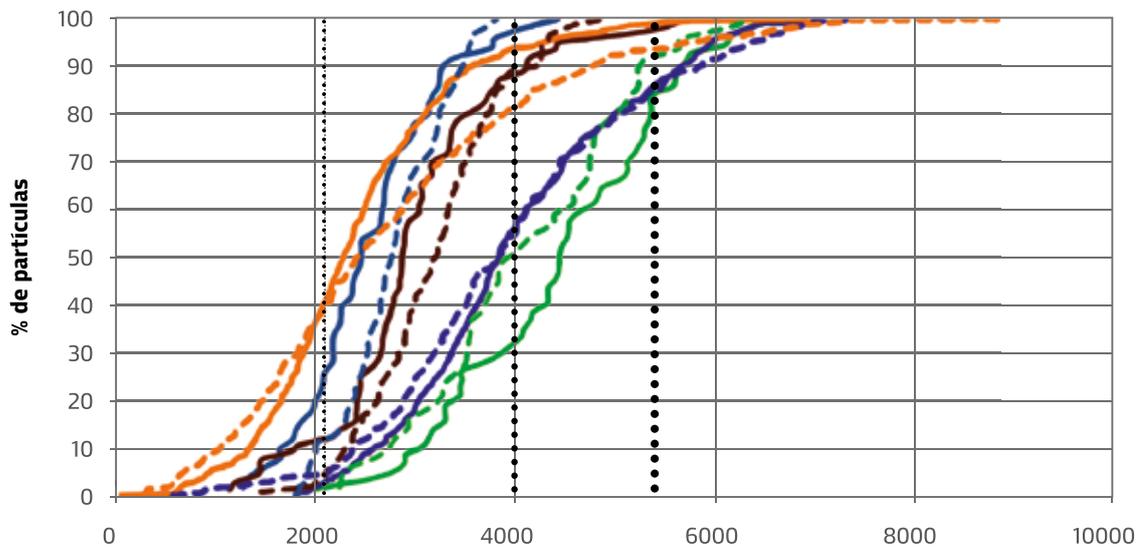
ANEXO 2 – ÍNDICE DA NORMA EUROPEIA DE AGREGADOS PARA MISTURAS ASFÁLTICAS VERSÃO PORTUGAL - EN 13043/2013

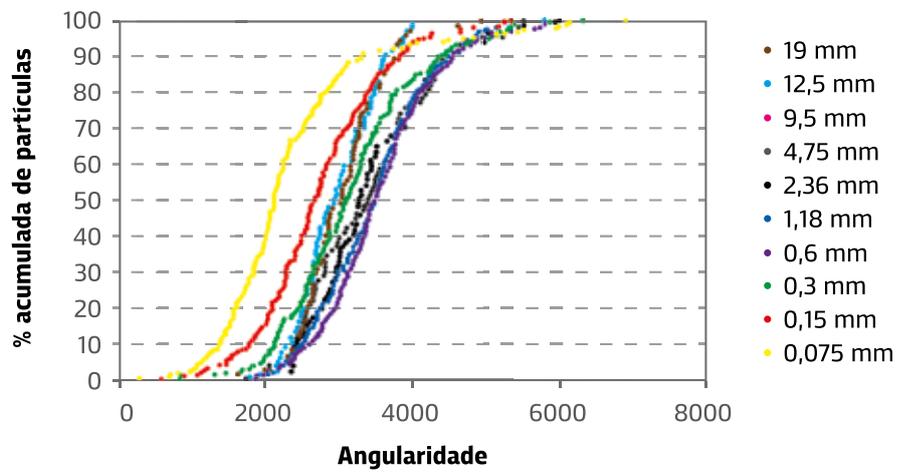
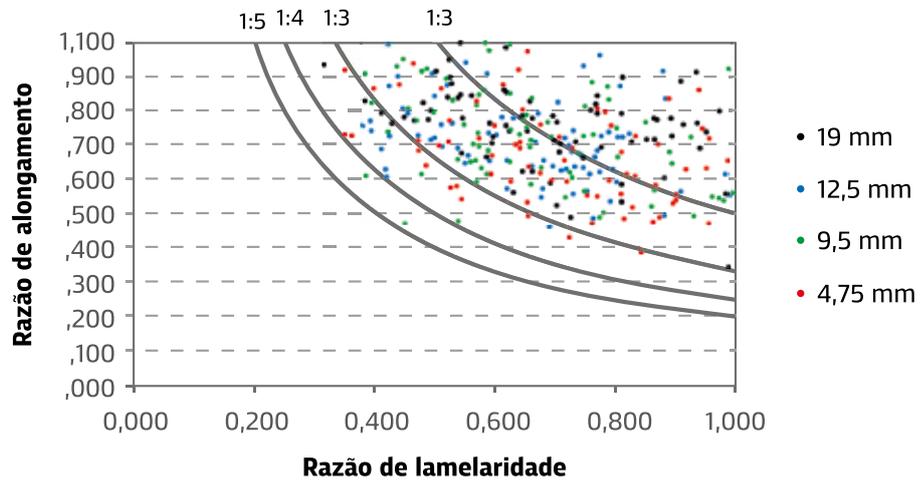
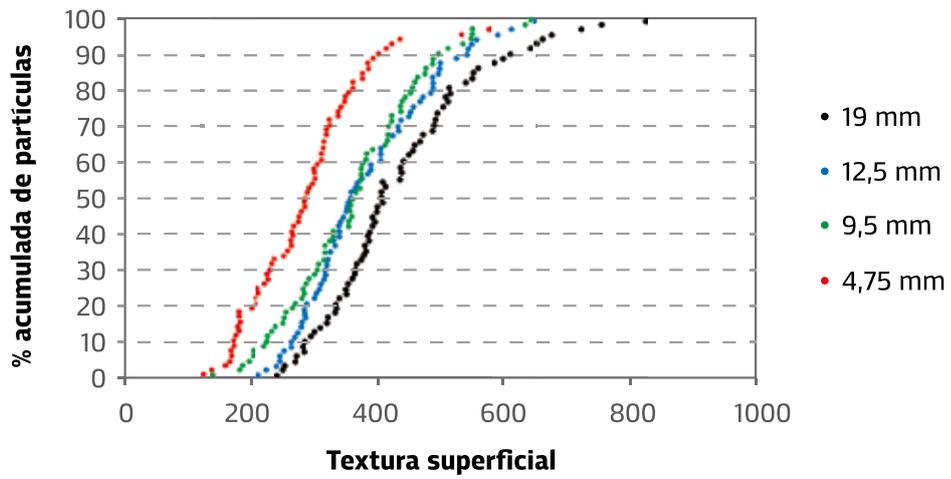
p. 4 de 53

Índice	Página
Preâmbulo	6
1 Objectivo e campo de aplicação.....	7
2 Referências normativas	7
3 Termos e definições	9
4 Requisitos para agregados grossos e agregados finos	10
4.1 Requisitos geométricos	10
4.2 Requisitos físicos	17
4.3 Requisitos químicos	22
5 Requisitos para o filer	24
5.1 Generalidades	24
5.2 Requisitos geométricos	25
5.3 Requisitos físicos	25
5.4 Requisitos químicos	26
5.5 Requisitos para a regularidade da produção de filer	28
6 Avaliação da conformidade.....	29
6.1 Generalidades	29
6.2 Ensaio de tipo iniciais	29
6.3 Controle da produção em fábrica	29
7 Designação	29
7.1 Designação e descrição	29
7.2 Informação adicional para a descrição de um agregado	30
8 Marcação e etiquetagem	30
Anexo A (informativo) Notas orientadoras sobre a resistência dos agregados ao gelo-degelo.....	31
Anexo B (normativo) Controle da produção em fábrica	33

ANEXO 3 – EXEMPLO DE RESULTADO DA ANÁLISE POR IMAGEM DE UM AGREGADO PELO PDI-AIMS E TABELAS DE CÁLCULO







Esfericidade

Tamanho	Número de partículas	Média	Desvio padrão
19,0mm (3/4")			
12,5mm (1/2")	50	0,65	0,11
9,5mm (3/8")	48	0,6	0,12
4,75mm (# 4)	49	0,49	0,08

Textura superficial

Tamanho	Número de partículas	Média	Desvio padrão
19,0mm (3/4")			
12,5mm (1/2")	50	329,4	126,1
9,5mm (3/8")	50	365,6	132,9
4,75mm (# 4)	50	272,5	143,9

Angularidade

Tamanho	Número de partículas	Média	Desvio padrão
19,0mm (3/4")			
12,5mm (1/2")	50	329,4	126,1
9,5mm (3/8")	50	365,6	132,9
4,75mm (# 4)	50	272,5	143,9
2,36mm (# 8)	153	3979,5	1030
1,18mm (# 16)	150	4089,1	1023
0,6mm (# 30)	150	4426	1158,5
0,3mm (# 50)	153	4157,1	1194,7
0,15mm (# 100)	162	2975,8	1165,8
0,075mm (# 200)	130	2374,1	1290,9

Forma 2D

Tamanho	Número de partículas	Média	Desvio padrão
2,36mm (# 8)	152	9,8	2,4
1,18mm (# 16)	150	8,7	2
0,6mm (# 30)	150	8,8	2,3
0,3mm (# 50)	153	8,4	2,4
0,15mm (# 100)	162	7,3	2,1
0,075mm (# 200)	130	8,3	2

% partículas lamelares e alongadas

Tamanho	Número de partículas	RLA $\leq 1:1$	RLA $\leq 1:1$	RLA $\leq 1:3$	RLA $\leq 1:4$	RLA $\leq 1:5$
19,0mm (3/4")						
12,5mm (1/2")	50	100%	68%	40%	18%	10%
9,5mm (3/8")	48	100%	81%	52%	29%	19%
4,75mm (# 4)	49	100%	100%	90%	57%	29%

% partículas lamelares e alongadas

Tamanho	Número de partículas	RLA ou RA > 1	RLA ou RA > 2	RLA ou RA > 3	RLA ou RA > 4	RLA ou RA > 5
19,0mm (3/4")						
12,5mm (1/2")	50	100%	50%	18%	8%	4%
9,5mm (3/8")	48	100%	68%	15%	4%	2%
4,75mm (# 4)	49	100%	88%	31%	6%	0%

Propriedade

Valores limite

Propriedade	Valores limite				
Forma 2D	< 4,0 circular	4,0-11,0 semicircular	11,0-15,5 semialongado	> 15,5 alongado	----
Angularidade	< 1.260 arredondado	1.260-4.080 subarredondado	4.080-7.180 subangular	> 7.180 angular	----
Esfericidade	< 0,5 achatado/alongado	0,5-0,7 baixa esfericidade	0,7-0,9 esfericidade moderada	> 0,9 alta esfericidade	----
Textura	< 260 polido	260-440 macio	440-600 baixa rugosidade	600-825 rugosidade moderada	> 825 alta rugosidade

