

Asfálticos



## **Capacitação da Equipe Técnica**

# **RELATÓRIO FINAL**

Novembro, 2011

## SUMÁRIO

1. Introdução .....	1
2. Terminologia.....	2
3. Materiais – Agregados e ligantes asfálticos.....	2
4. Dosagem de Misturas Asfálticas - Método Superpave .....	2
5. Avaliação de materiais e de misturas asfálticas .....	4
6. Considerações Finais .....	5
7. Programa do treinamento:.....	6
Referências .....	11
Anexo 1: Procedimento Rede 05/2010.....	15
Anexo 2: Aula Prática sobre Método Bailey .....	35
Anexo 3: Planilha do Método Bailey .....	40
Anexo 4: Dosagem Superpave .....	44
Anexo 5: Slides.....	58

## 1. Introdução

Este relatório apresenta um resumo das atividades realizadas no período de novembro de 2010 a novembro de 2011. As aulas teóricas da capacitação da equipe técnica foram ministradas na sala de reuniões e as aulas práticas foram realizadas no laboratório do novo centro de pesquisas da CCR, localizado na sede da Nova Dutra - Rodovia Presidente Dutra BR-116, em Santa Isabel, SP. O objetivo desse trabalho era treinar e capacitar a equipe técnica para realizar avaliação e caracterização dos diversos materiais e misturas asfálticas, empregando os ensaios convencionais e Superpave. Para isso foi feito o acompanhamento das atividades realizadas pela equipe técnica, assim como dos procedimentos atualmente adotados na avaliação, caracterização e dosagem dos materiais empregados na pavimentação asfáltica.

Após essa etapa de acompanhamento foi feita uma análise das técnicas empregadas, onde foi verificada a necessidade de alterações, atualizações e desenvolvimento de novos procedimentos. O treinamento foi composto por aulas teóricas e práticas.

O conteúdo das aulas tem como base os conceitos básicos sobre pavimentação asfáltica, incluindo materiais e misturas asfálticas.

Materiais:

- Tipos: ligantes asfálticos, agregados, solos e aditivos;
- Classificação: tradicional e Superpave;
- Caracterização: granulometria, densidades, Bailey, abrasão Los Angeles etc.

Misturas asfálticas:

- Tipos de misturas asfálticas: concreto asfáltico (CA), *stone matrix asphalt* (SMA), camada porosa de atrito (CPA), *gap-graded* (GG);
- Métodos de dosagem convencional e Superpave.
- Avaliação das misturas asfálticas: ensaios volumétricos (massa específica máxima, massa específica aparente, volume de vazios, vazios do agregado mineral) e mecânicos (módulo de resiliência, módulo dinâmico, *flow number* e fadiga).

Alguns assuntos que foram abordados:

## 2. Terminologia

Um dos maiores problemas encontrados entre profissionais que atuam na área de pavimentação asfáltica é o desconhecimento e emprego errado de termos técnicos. Por exemplo, uma expressão usual e inadequada é “chamar” o revestimento asfáltico de “asfalto” e os agregados de “pedra”. Outro equívoco é “traduzir” os termos técnicos aproveitando as siglas internacionais sem considerar a sua definição, por exemplo,  $G_{sa}$  = *Apparent Specific Gravity* = densidade real do agregado e não densidade aparente do agregado, que é  $G_{sb}$  = *Bulk Specific Gravity*.

## 3. Materiais – Agregados e ligantes asfálticos

Os materiais empregados em qualquer camada do pavimento devem ser caracterizados e avaliados antes de ser aplicados na construção do pavimento. Os agregados representam um dos materiais mais importantes, pois o pavimento é constituído por diversas camadas compostas quase que totalmente por agregados. Em uma mistura asfáltica, o agregado representa cerca de 95%, sendo essencial a análise e avaliação da sua composição e resistência. É o principal responsável por problemas de deformação permanente. O ligante asfáltico é outro material importante na composição da mistura asfáltica, pois um teor inadequado pode refletir em problemas posteriores (como deformação permanente, segregação, desagregação, trincas e buracos). Os dois materiais em conjunto podem ser responsáveis pelo surgimento de trincas por fadiga.

## 4. Dosagem de Misturas Asfálticas - Método Superpave

A Dosagem SUPERPAVE tem como diferença mais importante em relação ao Marshall o tipo de compactação: utiliza um compactador designado de giratório, que aplica energia por amassamento. É a metodologia usada atualmente nas universidades e Departamentos de Estradas dos EUA. No Brasil este tipo de dosagem tem sido feito em centros de pesquisas, mas obras federais já foram realizadas com este procedimento. A principal diferença com relação ao método Marshall é a forma de compactação.

Embora seja recente, a metodologia de dosagem SUPERPAVE nível 1, que é a utilizada no Brasil, tem limitação assim como na metodologia Marshall, de apenas

considerar os parâmetros volumétricos, sendo as propriedades mecânicas as que realmente se relacionam diretamente com o desempenho da mistura.

O compactador giratório foi adotado pelos pesquisadores do SHRP como dispositivo que compacta a amostra de mistura asfáltica mais próxima da compactação de campo, de modo que as densidades finais fossem aquelas obtidas no pavimento através de condições reais de clima e carregamento.

Seu princípio de funcionamento se compara a de um rolo compressor que, em vez de aplicar golpes de impacto, faz a compactação exercendo uma tensão de amassamento na mistura. Os parâmetros utilizados na operação do compactador giratório são: ângulo de rotação de  $1,25^\circ \pm 0,02^\circ$ ; taxa de 30 rpm; tensão de compressão aplicada ao CP durante a rotação de 600 kPa e capacidade de reproduzir corpos de provas com diâmetro de 100 mm e 150 mm. A **Figura 1** mostra um compactador giratório Servopac da IPC Global.



Figura 1: Compactador giratório Servopac – IPC Global.

## 5. Avaliação de materiais e de misturas asfálticas

A avaliação das misturas asfálticas em laboratório é realizada através de ensaios que determinam as propriedades volumétricas e mecânicas que simulam o comportamento em campo. Antes de realizar a dosagem da mistura asfáltica é necessário caracterizar os materiais disponíveis, uma vez que a qualidade da mistura e, conseqüentemente, do pavimento, está diretamente relacionada com as características dos materiais que a compõem. Por isso é fundamental realizar os ensaios de caracterização de ligantes asfálticos e de agregados.

Vale ressaltar que, a distribuição granulométrica do agregado é uma das características que asseguram o intertravamento das partículas, desde as mais graúdas às mais finas. Este intertravamento é o responsável pela estabilidade das misturas. Para avaliar o intertravamento das partículas é empregado o **Método Bailey**, que consiste em uma forma de seleção granulométrica que visa a escolha de uma estrutura adequada de agregados de misturas densas e descontínuas. O **método Bailey** permite também ajustes na quantidade de vazios das misturas em função da porcentagem de cada material e considera o intertravamento dos agregados graúdos o principal fator relacionado à resistência à deformação permanente da mistura (NASCIMENTO, 2008). Esta seleção granulométrica está relacionada diretamente com as características de compactação de cada fração de agregado na mistura, com os vazios do agregado mineral (VAM) e com os vazios da mistura (Vv). Possibilita a seleção da estrutura de agregados da mistura visando maior intertravamento dos agregados graúdos, seu uso é compatível com qualquer metodologia de dosagem: Superpave, Marshall, Hveem etc. (CUNHA, 2004).

Os principais ensaios para caracterização de materiais asfálticos são:

- Viscosidade Saybolt-furol e Brookfield;
- Ponto de amolecimento;
- Penetração;
- Densidade;
- Propriedades reológicas, que simulam o comportamento do ligante quanto à resistência a deformação permanente e fadiga através da metodologia Superpave.

Os principais ensaios de caracterização de agregados são:

- Análise granulométrica de agregados: métodos convencional e Bailey;
- Determinação da massa específica e absorção de agregados graúdos e miúdos;
- Determinação do desgaste por abrasão Los Angeles;
- Angularidade de agregado miúdo;
- Determinação de partículas chatas e alongadas em agregados graúdos.

Os principais ensaios de avaliação das misturas asfálticas são:

- Determinação da densidade máxima de misturas asfálticas não compactadas;
- Determinação da massa específica aparente de misturas betuminosas;
- Determinação do módulo resiliente de misturas asfálticas;
- Determinação da resistência à tração por compressão diametral;
- Determinação da vida de fadiga de misturas asfálticas;
- Determinação da resistência ao dano causado por umidade induzida em misturas betuminosas.

## **6. Considerações Finais**

Durante o período de treinamento foi feito o acompanhamento das atividades realizadas no laboratório, onde os técnicos aplicavam os conhecimentos adquiridos nas aulas teóricas e práticas. Dessa forma, foi possível observar a realização dos procedimentos de ensaios, assim como dos métodos de dosagens de misturas asfálticas. A partir do treinamento, ficou determinado que todos os materiais recebidos no laboratório devem ser submetidos a todos os ensaios de caracterização e avaliação, inclusive a análise do intertravamento dos agregados pelo método Bailey antes da dosagem (determinação do teor ótimo de ligante asfáltico), assim como a verificação posterior do comportamento da mistura.

Outro aspecto importante abordado foi a dosagem empregando o método Superpave e a moldagem dos corpos de prova com o compactador giratório, que representa um grande avanço, uma vez que a moldagem por amassamento empregando o compactador giratório simula mais a passagem do rolo compactador no campo.

## 7. Programa do treinamento:

Aula 1: Introdução e Breve Histórico da Pavimentação no Brasil – ok!

Aula 2: Terminologia e Noções Gerais sobre pavimentação – ok!

Aulas 3 e 4: Agregados – tipos e ensaios – ok!

Aula 5: Agregados – Superpave – ok!

Aulas 6, 7, 8 e 9: Método Bailey - teoria e prática – ok!

Aula 10: Ligantes asfálticos convencionais - tipos e ensaios – ok!

Aula 11: Ligantes modificados - tipos e ensaios – ok!

Aula 12: Ligantes asfálticos - Superpave – ok!

Aulas 13 e 14: Misturas Asfálticas – tipos: concreto asfáltico; *stone matrix asphalt*; *gap graded*; camada porosa de atrito – ok!

Aulas 15 e 16: Dosagem de Misturas Asfálticas - Método Marshall – ok!

Aula 17, 18, 19 e 20: Dosagem de Misturas Asfálticas - Método Superpave - teoria e prática – ok!

Aulas 21, 22, 23 e 24: Ensaios - teoria e prática

**Vale ressaltar que a maior parte do material didático utilizado nas aulas faz parte do curso de atualização sobre pavimentação asfáltica e foram gentilmente cedidos pelos autores do livro *Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros* (BERNUCCI *et al.*, 2008).**

**O procedimento utilizado para Análise do Intertravamento da Estrutura Pétreia empregando o método Bailey é apresentado no Anexo 1: PROCEDIMENTO REDE 05/2010. O Anexo 2 contém um exercício sobre aplicação do Método Bailey desenvolvido na aula prática e o Anexo 3 apresenta um exemplo de planilha utilizada no cálculo dos parâmetros do método Bailey. O método de dosagem Superpave está no Anexo 4 e todos os slides apresentados nas aulas estão no Anexo 5.**

As Figuras 2, 3, 4, 5 e 6 mostram fotos das aulas práticas realizadas no laboratório. Essas figuras ilustram a parte do ensaio de intertravamento de agregados do método Bailey em que são preparados os corpos de prova para determinar as massas específicas, solta e compactada, dos agregados.



Figura 2: Determinação da massa específica solta do agregado miúdo (pó de pedra)  
(Fotos de Charles Magno e Ronaldo Aparecido dos Santos).

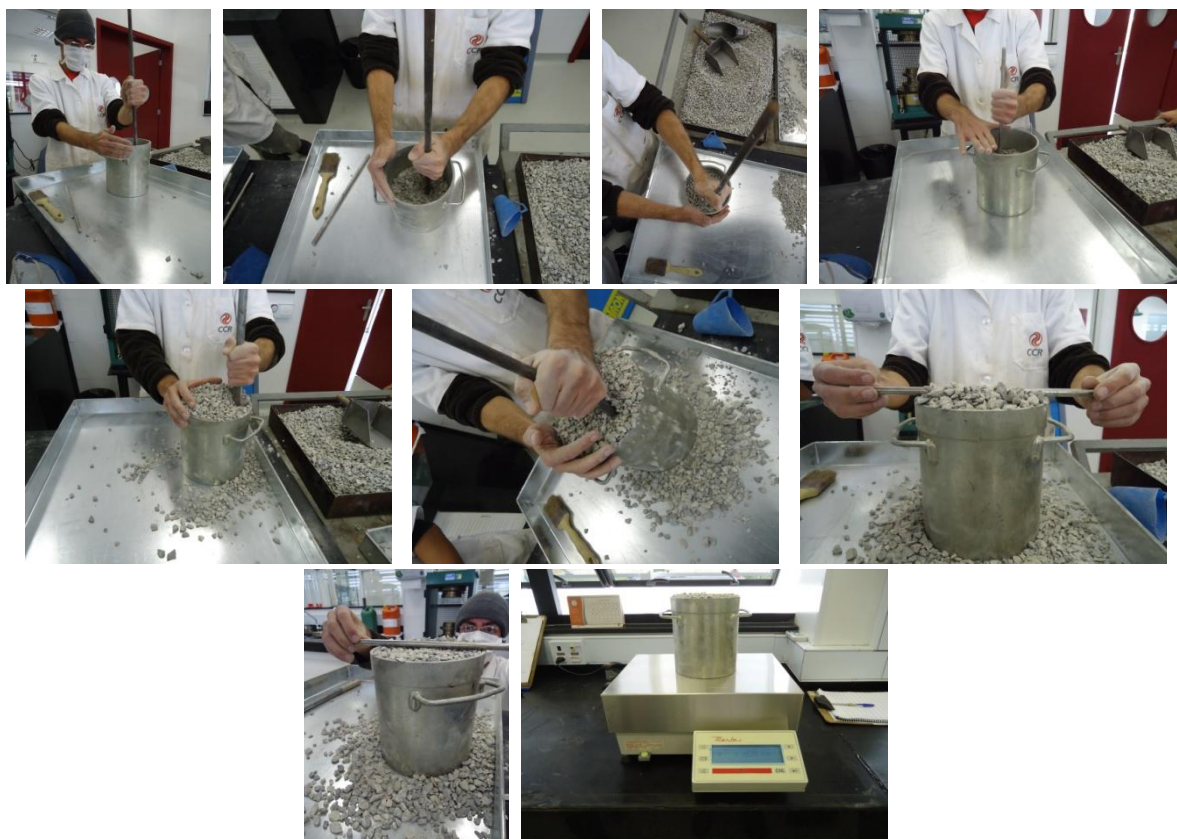


Figura 3: Determinação da massa específica solta do agregado graúdo (Brita 0)  
(Fotos de Charles Magno e Ronaldo Aparecido dos Santos).



Figura 4: Determinação da massa específica compactada do agregado graúdo (Brita 0)  
(Fotos de Charles Magno e Ronaldo Aparecido dos Santos).

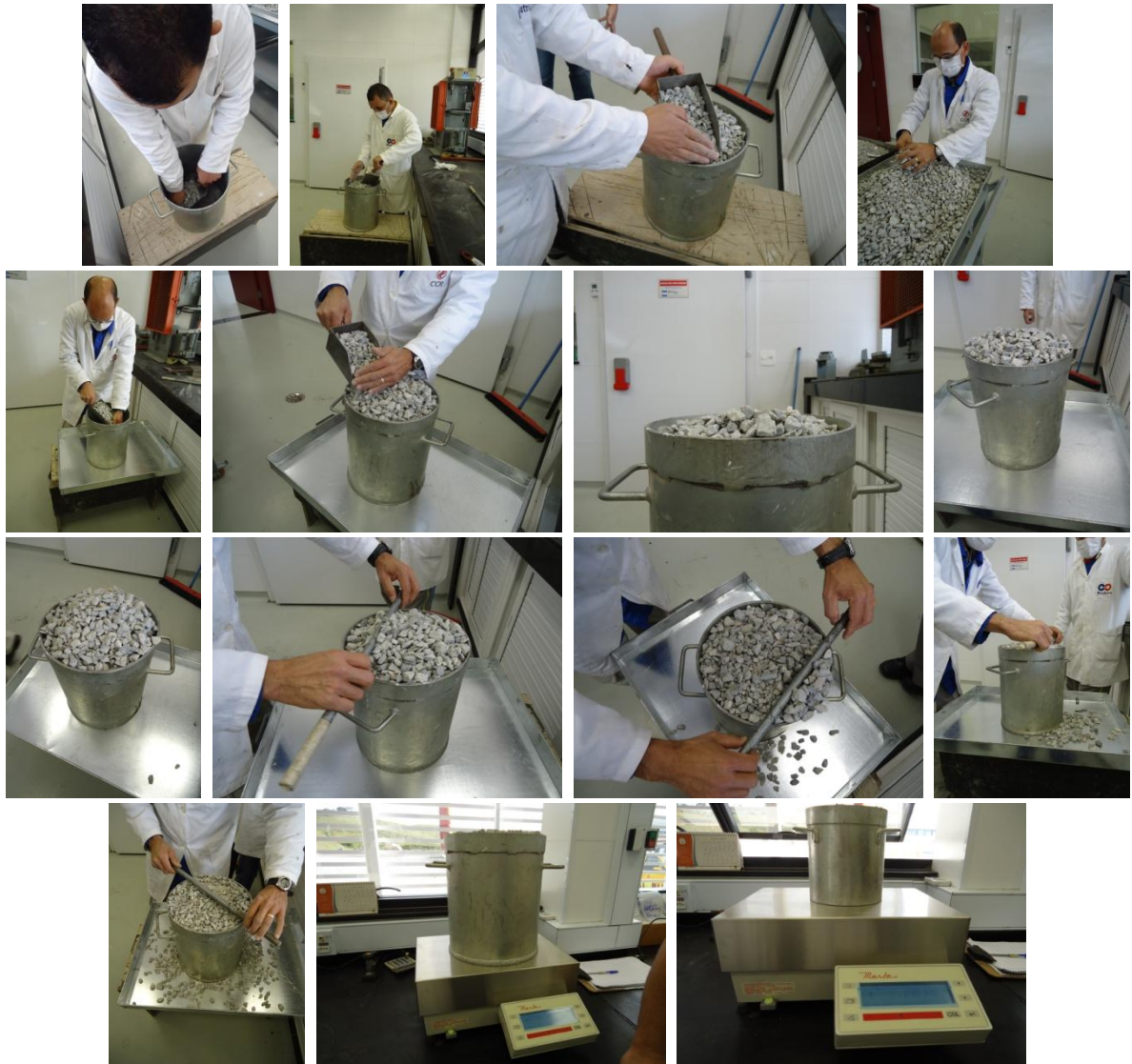


Figura 5: Determinação da massa específica solta do agregado graúdo (Brita 1)  
(Fotos de Charles Magno e Ronaldo Aparecido dos Santos).

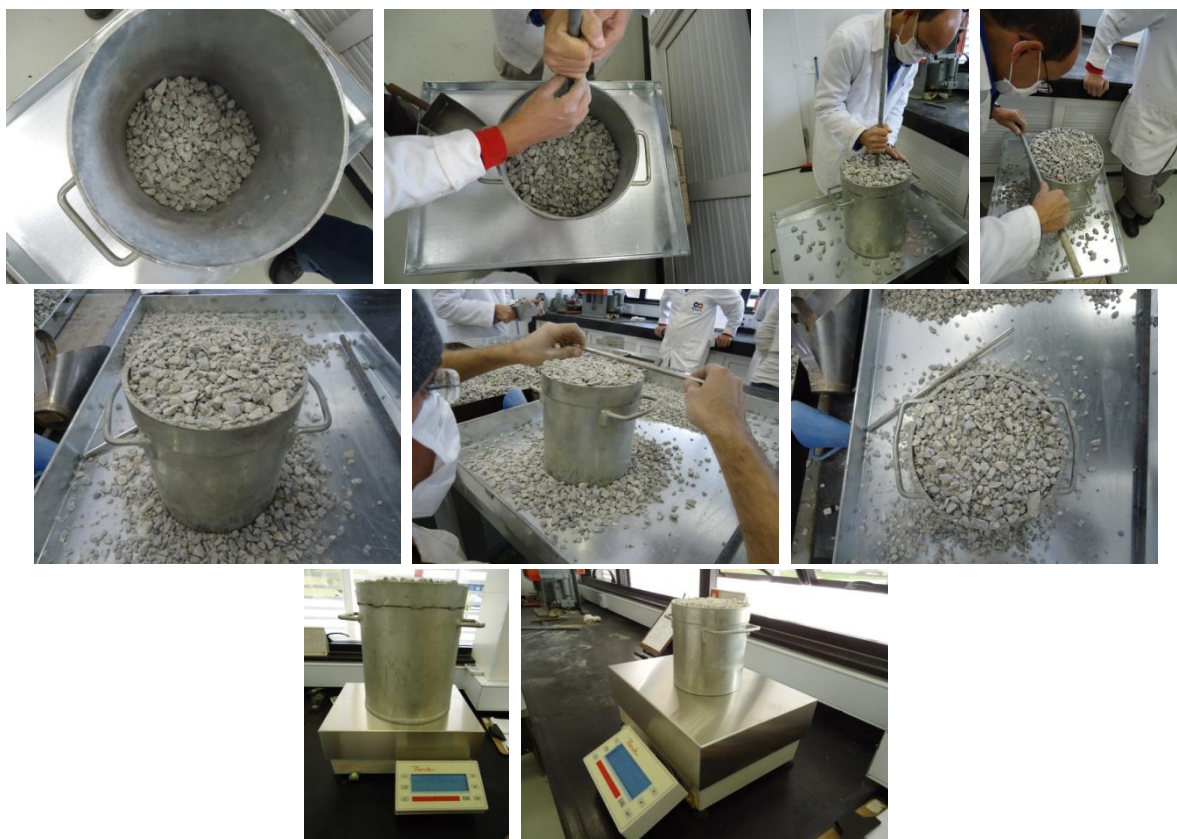


Figura 6: Determinação da massa específica compactada do agregado graúdo (Brita 1)  
(Fotos de Charles Magno e Ronaldo Aparecido dos Santos).

A Figura 7 apresenta a moldagem de corpo de prova com o compactador giratório como parte da aula prática de dosagem de mistura asfáltica empregando o método Superpave, em que são moldados CPs de 150 mm de diâmetro.



Figura 7: Aula prática de dosagem Superpave – moldagem de CP com o compactador giratório.

## Referências

AASHTO 2002 Design Guide - Determinação do *Flow Number*

AASHTO M 320-09 - *Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder*

AASHTO M 323-04 - *Superpave Volumetric Mix Design*

AASHTO MP 2, *Standard Specifications for SUPERPAVE Volumetric Mix Design*. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO MP2-01, Washington, D. C., 2001.

AASHTO MP 8-02 - *Stone Matrix Asphalt (SMA)*

AASHTO T 176-08 - *Standard Method of Test for Plastic Fines in Graded Aggregates and Soils by Use of the Sand Equivalent Test*

AASHTO T 19-09 - *Bulk Density and Voids in Aggregate*

AASHTO T 283-07 - *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage*

AASHTO T 326-05 - *Standard Method of Test for Uncompacted Void Content of Coarse Aggregate (As Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading)*

ABNT NBR 11341:2008 - Derivados de petróleo - Determinação do ponto de fulgor em vaso aberto de Cleveland

ABNT NBR 12583:1992 - Determinação da adesividade a ligante betuminoso de agregado graúdo

ABNT NBR 12584:1992 - Determinação da adesividade a ligante betuminoso de agregado miúdo

- ABNT NBR 12891:1993 - Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall
- ABNT NBR 14950:2003 - Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt-Furol de material betuminoso
- ABNT NBR 15086:2006 - Materiais betuminosos - Determinação da recuperação elástica pelo dutilômetro
- ABNT NBR 15087:2004 - Determinação da resistência à tração por compressão diametral
- ABNT NBR 15140:2004 - Determinação do desgaste por abrasão Cantabro
- ABNT NBR 15184:2004 - Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperatura elevada usando um viscosímetro rotacional
- ABNT NBR 15529:2007 - Asfalto borracha - Propriedades reológicas de materiais não newtonianos por viscosímetro rotacional
- ABNT NBR 15573:2008 - Determinação da massa específica aparente de corpos de prova compactados
- ABNT NBR 15619:2008 - Determinação da massa específica máxima medida em amostras não compactadas
- ABNT NBR 15785:2010 - Misturas asfálticas a quente - Utilização da aparelhagem Marshall para preparação dos corpos de prova com diferentes dimensões e aplicações
- ABNT NBR 6293:2001 - Materiais betuminosos - Determinação da ductilidade
- ABNT NBR 6560:2008 - Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do Anel e Bola
- ABNT NBR 6576:2007 - Materiais asfálticos - Determinação da penetração
- ABNT NBR 7809:2006 - Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro
- ABNT NBR NM 45: 2006 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios
- AFNOR NF P98-137 - *Béton Bitumineux Très Mince* (BBTM)
- AFNOR NF P98-140 - *Enrobés à Module Eleve* (EME)
- ANTT - Concessões de rodovias. Agência Nacional de Transportes Terrestres. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/concessaorod/apresentacaorod.asp>. Brasília, DF. maio/2010.
- ASTM C 1252-06 - *Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading)*
- ASTM C 127-07 - *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*
- ASTM C 128-07 REV A - *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*
- ASTM C 131-06 - *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*
- ASTM C 136-06 - *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*
- ASTM D 2726-08 - *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures*
- ASTM D 3203-94 - *Standard Test Method for Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Bituminous Paving Mixtures*
- ASTM D 3497-79 - *Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures*

- ASTM D 4791-07 - *Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate*
- ASTM D 6816-02 - *Standard Practice for Determining Low-Temperature Performance Grade (PG) of Asphalt Binders*
- ASTM D 7369-09 - *Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test*
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; *et al. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*, 1ª Edição PETROBRAS/ABEDA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- CALTRANS. Gap-graded (GG). Caltrans SSP 39-700 A-10-01-01. California Department of Transportation, "Standard Special Provisions", Sacramento, CA, 2001
- CAPITÃO, S. D. Caracterização mecânica de misturas betuminosas de alto módulo de deformabilidade. Tese de Doutorado. Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal, 2003.
- CAVALCANTI, L. S. *Efeito de Alguns Modificadores de Ligantes na Vida de Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas*. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 177 p., 2010.
- CHRISTENSEN; A. Interpretation of Dynamic Mechanical Test Data for Paving Grade Asphalt Cements. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists. V.61, p.67-116, 1992
- DI BENEDETTO, H., DE LA ROCHE, C. State of the art on stiffness modulus and fatigue of bituminous mixtures. Rilem Report 17, Bituminous binders and mixes. Brussels, Belgium, 1998.
- DNER ES 308-97 - Tratamento Superficial Simples (TSS)
- DNER ES 309-97 - Tratamento Superficial Duplo (TSD)
- DNER ES 310-97 - Tratamento Superficial Triplo (TST)
- DNER ES 317-97 - Pré-misturado a frio (PMF)
- DNER ES 318-97 - Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)
- DNER ES 322-97 - Sub-base de concreto de cimento Portland, compactada com rolo (sub-base de concreto rolado)
- DNER ES 386-99 - Camada Porosa de Atrito (CPA)
- DNER ES 389-99 - Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF)
- DNER ME 080-94 - Análise granulométrica por peneiramento
- DNIT ES 031-06 - Concreto Asfáltico (CA)
- DNIT ES 032-06 - Areia-asfalto a quente (AAQ)
- FERRY, J. D. Viscoelastic Properties Of Polymers. John Wiley, New York, 1980.
- FONTES, L. P. T. L. Otimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos. Tese de Doutorado. Universidade do Minho. Universidade Federal de Santa Catarina. 545 p., 2009.
- MARQUES, G.L.O. Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 480 p., Rio de Janeiro, RJ, 2004.

- MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. Mecânica dos pavimentos. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ, 2005.
- MONISMITH, C. L.; EPPS, J. A.; KASIANCHUK, A.; McLEAN, D. B. Asphalt mixture behaviour on repeated flexure. Report nº. TE 70-5, University of California, Berkeley, USA, 1971.
- MOTTA, L. M. G. Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1991.
- MOTTA, L. M. G.; TONIAL, I.; LEITE, L. M.; CONSTANTINO, R. S. Princípios do projeto e análise Superpave de misturas asfálticas. Rio de Janeiro: IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Rio de Janeiro, RJ, 1996.
- 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, Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2008.
- Procedimento REDE 05/2010 - Método Bailey – Análise do intertravamento da estrutura pétreo. Petrobras, Rio de Janeiro, RJ, 2010.
- TRB - *Transportation Research Circular E-C124. Practical approaches to hot-mix asphalt mix design and production quality control testing*, pp. 12-32, Washington, D.C., EUA, Dezembro, 2007.
- VAVRIK, W. R.; PINE, W. J.; HUBER, G. A. *et al. The Bailey Method of Gradation Evaluation: The influence of aggregate gradation and packing characteristics on voids in mineral aggregate*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.70, 2001.

**Anexo 1: Procedimento Rede 05/2010**

**ANÁLISE DO INTERTRAVAMENTO DA ESTRUTURA  
PÉTRETA - MÉTODO BAILEY**



## PROCEDIMENTO REDE 05/2010

### Análise do Intertravamento da Estrutura Pétreo - Método Bailey

O **método Bailey** foi desenvolvido pelo engenheiro Robert Bailey do Departamento de Transportes de Illinois (IDOT) na década de 1980 e tem como objetivo auxiliar na seleção granulométrica, de formar a obter uma estrutura adequada de agregados para misturas densas e descontínuas, assim como na avaliação de misturas de agregados já definidas (VAVRIK *et al.*, 2002). Esta seleção granulométrica está relacionada diretamente com as características de compactação de cada fração de agregado na mistura, com os vazios do agregado mineral (VMA) e com os vazios da mistura (Vv). Possibilita a seleção da estrutura de agregados da mistura visando **maior intertravamento dos agregados graúdos**, seu uso é compatível com qualquer metodologia de dosagem: SUPERPAVE, Marshall, Hveem etc. (CUNHA, 2004).

Os procedimentos originalmente desenvolvidos por Bailey vêm sendo aprimorados por **Bill Vavrik**, da *ERES Consultant Division of Applied Research Associates, Inc.*, e **Bill Pine**, da *Heritage Research*, que desenvolveram procedimentos que facilitam a aplicação do método Bailey de forma a permitir sua aplicação em várias misturas independente do tamanho máximo do agregado (VAVRIK *et al.*, 2002). O método permite também ajustes na quantidade de vazios das misturas em função da porcentagem de cada material e considera o intertravamento dos agregados graúdos o principal fator relacionado à resistência à deformação permanente da mistura (NASCIMENTO, 2008; CAVALCANTI, 2010).

O método Bailey usa dois princípios que são base para a relação entre a granulometria de agregados e os parâmetros volumétricos de misturas:

- arranjo de agregados, e
- definição de agregado graúdo e miúdo.

Com esses princípios, os passos iniciais no método Bailey são:

- combinar os agregados em volume, e
- analisar a mistura combinada.

#### Arranjo de Agregados

Geralmente, apenas as partículas de um agregado não são suficientes para preencher um determinado volume completamente. Sempre haverá espaço entre as partículas de agregados. O grau de arranjo depende de:

- granulometria dos agregados: varia de acordo com o tipo de mistura selecionada, sendo, geralmente, necessária a combinação e mistura de agregados de diferentes granulometrias;
- tipo e energia de compactação: diversos tipos de energia de compactação podem ser empregados, como pressão estática, impacto (por exemplo, soquete Marshall), ou



cisalhamento (por exemplo, compactador giratório ou compactador por amassamento). Uma densidade maior pode ser atingida com o aumento do esforço de compactação (por exemplo, maior pressão estática, mais golpes, ou maior enchimento ou número de giros);

- forma dos agregados: partículas cúbicas tendem a apresentar maior intertravamento e atrito interno, resultando consequentemente em uma maior estabilidade mecânica que partículas arredondadas. Partículas chatas e alongadas tendem a dificultar a compactação e podem impedir uma resistência satisfatória na mistura asfáltica;
- textura superficial dos agregados: partículas com texturas rugosas tendem a aumentar a resistência e requerem ligante asfáltico adicional para superar a perda de trabalhabilidade, quando comparada com agregados de superfícies lisas como cascalhos e areias de rio;
- resistência das partículas: afeta diretamente as propriedades da mistura durante a moldagem de corpos de prova ou sob a ação de rolos compactadores quando da aplicação em campo. Agregados mais frágeis se degradam mais que agregados mais resistentes.

As propriedades citadas anteriormente podem ser usadas para caracterizar tanto os agregados graúdos quanto os agregados miúdos. As características individuais de um dado agregado, juntamente com a sua proporção na composição granulométrica, têm impacto direto nas propriedades resultantes da mistura. Ao comparar agregados de diferentes tamanhos e origens, deve-se considerar essas características individuais juntamente com os princípios do método Bailey. Mesmo que um determinado agregado apresente características aceitáveis, ele pode não ser adequado para a combinação com outros agregados propostos para o uso no projeto. A granulometria final de agregados graúdos e miúdos e suas propriedades individuais correspondentes determinam as características de arranjo da mistura para um dado tipo e grau de compactação. Portanto, a seleção dos agregados é uma parte importante do processo de projeto de mistura asfáltica.

#### **Agregado graúdo x Agregado miúdo**

No método Bailey, as definições de **agregado graúdo** e **agregado miúdo** não é feita da forma convencional como é considerada na ASTM e no DNIT, e sim de forma mais específica para cada conjunto de materiais: **agregados graúdos** são partículas que acondicionadas a um certo volume criam vazios que podem ser preenchidos por partículas de tamanho menor. Todas as partículas que preenchem os vazios dos graúdos são consideradas **agregados miúdos**. A partir dessas definições, pode-se verificar que mais de um tamanho de agregado é necessário para definir graúdo ou miúdo.

A definição de graúdo e miúdo depende do **tamanho nominal máximo** (**NMAS** = *Nominal Maximum Aggregate Size* ou **NMPS** = *Nominal Maximum Particle Size*) da mistura de agregados. O **NMAS** é definido como sendo a **abertura da peneira anterior a primeira peneira que retém mais de 15% de material** da amostra da granulometria total em avaliação (ASPHALT INSTITUTE, 2011).



Para tanto devem ser determinadas as peneiras de controle adotadas pelo método Bailey: **Peneira de Controle Primário (PCS = Primary Control Sieve)**, **Peneira de Controle Secundário (SCS = Secondary Control Sieve)**, **Peneira de Controle Terciário (TCS = Tertiary Control Sieve)** e **Peneira Média (HS = Half Sieve)** (ASPHALT INSTITUTE, 2011).

Todo material que fica retido na PCS é considerado agregado graúdo. O material que passa na PCS e fica retido na SCS é a fração graúda do agregado miúdo e o material que passa na SCS é considerado como fração miúda do agregado miúdo. A TCS é usada para avaliação da fração miúda do agregado miúdo e a HS para avaliação da fração graúda da mistura (ASPHALT INSTITUTE, 2011).

A Figura 1 mostra uma visão geral das divisões de uma mistura de agregados nas três proporções.

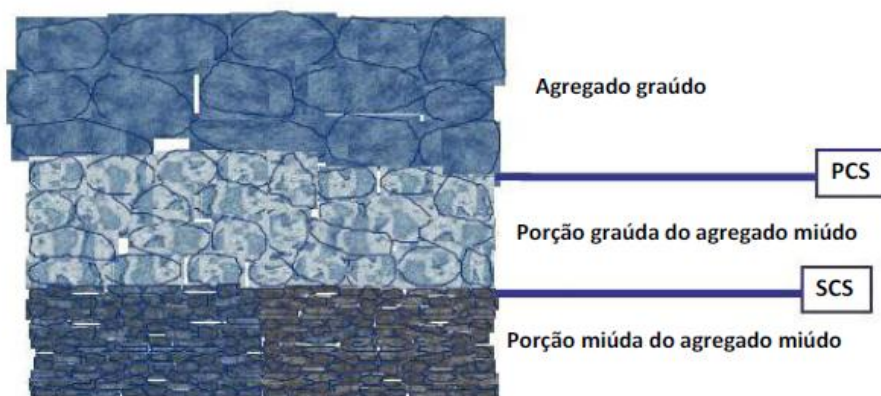


Figura 1: Visão geral das divisões de uma mistura de agregados de granulometria contínua (adaptada de VAVRIK *et al.*, 2002)

A partir da quantidade de material passante na PCS pode-se definir se a mistura de agregados é graúda ou miúda (ASPHALT INSTITUTE, 2011):

- Se **49,9% ou menos** da mistura de materiais passa na PCS, considera-se **graúda, CA**;
- Se **50% ou mais** da mistura de materiais passa na PCS, considera-se **miúda, FA**.

Na **Tabela 1** estão indicadas as peneiras de controle em função de vários NMAS.

Tabela 1: Peneiras de controle de acordo com o NMAS (VAVRIK *et al.*, 2002).

Peneiras de Controle	Tamanho Máximo Nominal (NMAS), mm					
	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75
HS	19	12,5	9,5	6,25	4,75	2,36
PCS	9,5	4,75	4,75	2,36	2,36	1,18
SCS	2,36	1,18	1,18	0,60	0,60	0,30
TCS	0,60	0,30	0,30	0,15	0,15	0,075



A PCS é obtida através da multiplicação do NMAS por 0,22:

$$PCS = NMAS \times 0,22 \quad (1)$$

O valor de 0,22 foi determinado a partir de uma análise em duas (2D) e três dimensões (3D) do arranjo de agregados de diferentes formas. A análise 2D da granulometria de agregados mostra que a proporção do diâmetro do agregado varia de 0,155 (geral) a 0,289 (achatados) com um valor médio de 0,22. A análise 3D da granulometria dos agregados fornece um resultado parecido com a proporção do diâmetro do agregado variando de 0,15 (esferas hexagonais) até 0,42 (arranjo cúbico de esferas). Além disso, pesquisas sobre o arranjo de agregados mostram distintamente que o arranjo de agregados segue modelos diferentes quando o diâmetro característico estiver acima ou abaixo da razão de 0,22 (VAVRIK *et al.*, 2002).

A **SCS** é definida como o produto do valor encontrado de PCS pelo fator 0,22 e a **TCS** pelo produto entre a SCS e o mesmo fator 0,22, conforme as seguintes expressões:

$$SCS = PCS \times 0,22 \quad (2)$$

$$TCS = SCS \times 0,22 \quad (3)$$

#### **Análise da mistura de agregados combinada**

A análise da mistura se faz por meio dos parâmetros: proporção CA (*Coarse Aggregate Ratio* = proporção de agregado graúdo), proporção FAc (*Fine Aggregate Coarse Ratio* = proporção graúda do agregado miúdo) e proporção FAf (*Fine Aggregate Fine Ratio* = proporção miúda do agregado miúdo), determinados pelas expressões seguintes:

$$Proporção\ CA = \frac{\% \text{ passante na HS} - \% \text{ passante na PCS}}{100 - \% \text{ passante na HS}} \quad (4)$$

$$Proporção\ FAc = \frac{\% \text{ passante na SCS}}{\% \text{ passante na PCS}} \quad (5)$$

$$Proporção\ FAf = \frac{\% \text{ passante na TCS}}{\% \text{ passante na SCS}} \quad (6)$$

Na Tabela 2 estão indicados os limites das proporções dos agregados com comportamento graúdo segundo VAVRIK *et al.* (2002).

Tabela 2: Limites das proporções de agregados com comportamento graúdo (VAVRIK *et al.*, 2002).

Parâmetros	Tamanho Máximo Nominal (NMA), mm					
	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75
Proporção CA	0,80-0,95	0,70-0,85	0,60-0,75	0,50-0,65	0,40-0,55	0,30-0,45
Proporção FAc	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50
Proporção FAF	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50

A proporção **CA** é o fator mais importante da análise da mistura. Uma proporção **CA baixa** indica que há alta compactação dos agregados miúdos que necessitam de uma forte estrutura para alcançar as propriedades requeridas. Misturas com proporção **CA abaixo** do recomendado são mais suscetíveis à segregação, enquanto que valores acima do recomendado, geralmente, apresentam dificuldades de compactação em campo (CUNHA, 2004).

O agregado miúdo abaixo da PCS pode ser considerado como uma mistura contendo uma parte graúda, **FAc**, e outra miúda, **FAf**. No entanto, os vazios desta mistura não podem ser preenchidos totalmente, pois ainda deve haver vazios para serem preenchidos por asfalto, além dos vazios necessários para o bom desempenho da mistura.

Valores da proporção **FAc acima** do recomendado indicam maior compactação da fração miúda que passa na PCS, devido ao aumento, em volume, da porção miúda do agregado miúdo. Este tipo de mistura quando analisada no gráfico de potência 0,45 mostra um desvio para baixo da porção miúda, o que indica uma mistura não adequada sob o ponto de vista estrutural (NASCIMENTO, 2008).

O VMA também aumenta com o aumento da proporção FAc. Valores de **FAc abaixo** do recomendado indicam uma graduação não uniforme, caracterizando, geralmente, uma mistura aberta e que apresenta um desvio no gráfico de potência 0,45, o que pode indicar instabilidade e possíveis problemas de compactação.

A fração miúda dos agregados miúdos preenche os vazios criados pela porção graúda dos agregados miúdos. A proporção **FAf** é usada para avaliar as características de compactação da porção de agregados de menor tamanho na mistura. O VMA aumenta com a redução da proporção FAF.

#### Seleção da granulometria de uma mistura a partir do método Bailey

Um dos objetivos do método Bailey é auxiliar na seleção granulométrica de uma mistura asfáltica, de forma que apresente uma estrutura adequada de agregados. Para isso, a seleção da granulometria de uma nova mistura de agregados pode ser feita a partir da escolha de um peso unitário inicial, **CUW** (*Chosen Unit Weight*), da fração graúda, CA. Para misturas de granulometria de comportamento graúdo ou fino, o CUW se refere a uma porcentagem do peso unitário solto



(LUW - Loose Unit Weight) da fração graúda, CA. No caso de misturas de comportamento graúdo, o CUW varia de 95% a 105% do LUW. Enquanto que para misturas de comportamento fino, o CUW varia de 60% a 85% do LUW. Para misturas do tipo SMA, o CUW se refere a uma porcentagem do peso unitário compactado (RUW) da fração graúda, CA, variando de 110 a 125% do RUW (Rodded Unit Weight).

A princípio se escolhe uma **massa específica do agregado graúdo** que deve ficar entre o limite inferior dado pela massa específica solta e o valor da massa específica compactada, levando em conta que, para se ter adequado intertravamento da mistura é necessário que a massa específica fique entre 95% e 105% da massa específica solta do agregado graúdo, no caso de misturas de comportamento graúdo. Valores acima de 105% tornam a mistura mais difícil de ser compactada, necessitando maior esforço para atingir a densidade desejada, valores abaixo de 95% caracterizam a mistura como de comportamento fino, não havendo condição mínima de contato entre as partículas graúdas.

As massas específicas solta e compactada de cada agregado são determinadas usando o procedimento de compactação descrito na AASHTO T-19-09. A massa específica (kg/m<sup>3</sup>) é calculada dividindo-se a massa de agregado pelo volume do recipiente metálico. Usando a densidade aparente do agregado,  $G_{sb}$ , e a massa específica (solta e compactada) podem ser determinados os volumes de vazios para as condições solta e compactada. O volume de vazios na condição solta representa os agregados em contato e sem nenhum outro esforço de compactação aplicado, enquanto que o volume de vazios na condição compactada representa os agregados em maior contato devido ao esforço de compactação aplicado.

O volume de vazios na condição solta,  $VCA_{LUW}$ , pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$VCA_{LUW} = \left( 1 - \frac{G_{LUW}}{G_{sb} \times G_w} \right) \times 100 \quad (7)$$

onde:

$LUW$  = Peso unitário solto = massa/volume

$VCA_{LUW}$  = vazios do agregado em estado solto, em %

$G_{LUW}$  =  $LUW$  = massa específica aparente em estado solto, em g/cm<sup>3</sup>

$G_{sb}$  = massa específica aparente da fração graúda do agregado, em g/cm<sup>3</sup>

$G_w$  = massa específica da água (0,998 g/cm<sup>3</sup>)

O volume de vazios na condição compactada,  $VCA_{RUW}$ , pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$VCA_{RUW} = \left( 1 - \frac{G_{RUW}}{G_{sb} \times G_w} \right) \times 100 \quad (8)$$

onde:

$RUW$  = *Peso unitário compactado*

$VCA_{RUW}$  = vazios da fração graúda do agregado compactado, %;



$G_{RUW}$  = massa específica da fração graúda do agregado seco compactado,  $\text{g/cm}^3$ ;

$G_w$  = massa específica da água ( $0,998 \text{ g/cm}^3$ );

$G_{sb}$  = massa específica aparente da fração graúda do agregado,  $\text{g/cm}^3$ .

Para materiais de comportamento graúdo, CA

- $VCA_{LUW}$  varia de 43 a 49%
- $VCA_{RUW}$  varia de 37 a 43%

Para materiais de comportamento fino, FA

- $VCA_{LUW}$  varia de 35 a 43%
- $VCA_{RUW}$  varia de 28 a 36%

### Análise do comportamento da mistura de agregados

O método Bailey permite analisar o comportamento da mistura que pode ser graúdo ou fino. A definição desse comportamento se faz por meio da análise do volume de vazios disponível na fração graúda e pelo volume ocupado pela fração miúda. Caso o volume de vazios da fração graúda ( $VCA_{RUW}$ ) for maior do que a porcentagem de vazios dos agregados graúdos na mistura asfáltica ( $VCA_{mix}$ ) tem-se um comportamento graúdo da mistura. Por outro lado, se o volume da fração graúda for menor, tem-se um comportamento fino. A determinação desses volumes é feita com base na massa específica solta e compactada dos agregados graúdos e da massa específica compactada das frações miúdas (AASHTO T19-09).

Para determinar o  $VCA_{mix}$  (vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada) deve ser utilizada a seguinte expressão:

$$VCA_{mix} = 100 - \left( \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times P_{CA} \right) \quad (9)$$

onde:

$VCA_{mix}$  = vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada, %;

$G_{mb}$  = massa específica aparente da mistura compactada,  $\text{g/cm}^3$ ;

$G_{sb}$  = massa específica aparente da fração graúda do agregado,  $\text{g/cm}^3$ ;

$P_{CA}$  = % de fração graúda do agregado em relação ao peso total da mistura.

Se  $VCA_{RUW} > VCA_{mix} \Rightarrow$  comportamento graúdo da mistura

Se  $VCA_{RUW} < VCA_{mix} \Rightarrow$  comportamento fino da mistura

No caso da mistura ter comportamento fino, deve ser refeita a análise considerando novas peneiras de controle e devem ser recalculadas as proporções CA, FAC e FAf conforme apresentado nas Tabelas 3 a 5. Para isso, após a definição das novas peneiras de controle, deve



ser considerado o material passante na PCS original como 100% e determinadas as porcentagens passantes das novas peneiras de controle (ASPHALT INSTITUTE, 2011).

Tabela 3: Novas peneiras de controle para misturas de comportamento fino (VAVRIK *et al.*, 2002).

Peneiras de Controle	Tamanho Máximo Nominal (NMAS), mm					
	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75
PCS original	9,5	4,75	4,75	2,36	2,36	1,18
Half Sieve nova	4,75	2,36	2,36	1,18	1,18	0,60
PCS nova	2,36	1,18	1,18	0,60	0,60	0,30
SCS nova	0,60	0,30	0,30	0,15	0,15	0,075
TCS nova	0,15	0,075	0,075	-	-	-

Tabela 4: Cálculo das novas proporções de misturas de agregados de comportamento fino (VAVRIK *et al.*, 2002).

NMAS, mm	Proporção		
	CA	FAC	FAf
37,5	$\frac{4,75-2,36}{100\%-4,75}$	$\frac{0,60}{2,36}$	$\frac{0,15}{0,60}$
25,0	$\frac{2,36-1,18}{100\%-2,36}$	$\frac{0,30}{1,18}$	$\frac{0,075}{0,30}$
19,0	$\frac{2,36-1,18}{100\%-2,36}$	$\frac{0,30}{1,18}$	$\frac{0,075}{0,30}$
12,5	$\frac{1,18-0,60}{100\%-1,18}$	$\frac{0,15}{0,60}$	**
9,5	$\frac{1,18-0,60}{100\%-1,18}$	$\frac{0,15}{0,60}$	**
4,75	$\frac{0,60-0,30}{100\%-0,60}$	$\frac{0,075}{0,30}$	**

\*\*Para essas misturas, apenas as novas proporções CA e FAC podem ser determinadas.

Tabela 5: Limites das proporções dos agregados com comportamento fino (VAVRIK *et al.*, 2002).

Parâmetros	Tamanho Máximo Nominal (NMAS), mm					
	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75
Proporção CA	0,60 - 1,00					
Proporção FAC	0,35 - 0,50					
Proporção FAf	0,35 - 0,50					



## REFERÊNCIAS

- AASHTO T19-09. *Standard Method of Test for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T 19M, Washington, D. C., 2004.
- ASPHALT INSTITUTE. *The Bailey Method. Achieving Volumetrics and HMA Compactability*. Asphalt Institute. Instructor Bill Pine, Heritage Research Group. Lexington, KY, January, 2011.
- CAVALCANTI, L. S. *Efeito de Alguns Modificadores de Ligantes na Vida de Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 177 p., 2010.
- CUNHA, M. B. *Avaliação do Método de Bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas*. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo - EESC, São Carlos, SP, 2004.
- NASCIMENTO, L. A. H. *Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente*. Dissertação (Mestrado). Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2008.
- VAVRIK, W. R.; HUBER, G. A.; PINE, W. J.; BAILEY, R.; CARPENTER, S. H. *Bailey Method for Gradation Selection in HMA Mixture Design*. Transportation Research Board of The National Academies. Transportation Research Circular. Number E-C044. ISSN 0097-8515. Washington, D.C., October, 2002.



## PROCEDIMENTO 1 – SELEÇÃO DA GRANULOMETRIA DE UMA NOVA MISTURA

Para determinar a granulometria de uma nova mistura combinada de agregados são necessários os seguintes dados:

- curva granulométrica de cada material (agregados e fíler mineral, MF);
- peneiras de controle primário: PCS;
- peso unitário solto, LUW;
- peso unitário compactado, RUW;
- massa específica aparente dos agregados, Gsb (*bulk specific gravity*), em  $\text{g/cm}^3$ .

Inicialmente, deve escolhido um peso unitário, CUW (*Chosen Unit Weight*), de cada agregado, correspondente a uma porcentagem do peso unitário solto (LUW) ou compactado (RUW), dependendo do tipo de mistura:

- misturas de comportamento graúdo, o CUW varia de 95% a 105% do LUW;
- misturas de comportamento fino, o CUW varia de 60% a 85% do LUW;
- misturas do tipo SMA, o CUW variando de 110 a 125% do RUW.

Recomenda-se sempre começar com um valor médio da % do peso unitário solto, ou seja, para misturas de comportamento graúdo usar 100%, para misturas de comportamento fino usar 73% e para misturas do tipo SMA adotar 118%.

Um aumento ou diminuição no valor de CUW CA resulta em um aumento ou diminuição do volume da fração graúda da mistura combinada.

- Se o CUW CA aumenta, a mistura combinada fica mais graúda.
- Se o CUW CA diminui, a mistura combinada fica mais fina.

Uma mudança de 10% no valor de CUW CA para qualquer tipo de mistura, geralmente, altera a porcentagem passante na PCS da mistura combinada de 4 a 5%.

Quando adequado, deve ser indicado a % passante na peneira 0,075 mm (#200) desejada (% *target*), em função do tipo de mistura asfáltica que será executada. Por exemplo, no caso de misturas do tipo SMA, esse valor deve estar entre 8 e 11% (AASHTO MP 325-08), sendo importante considerar como desejado o valor médio (entre o máximo e o mínimo). Ex. *Target* = 9%

**Passo 1:** determinar o peso por unidade de volume (massa) da contribuição da fração graúda, CA, (em relação a % do peso unitário escolhido da fração graúda e a mistura de CA por volume).

$CA = RUW \text{ ou } LUW (\text{kg/m}^3) - \text{Apenas um CA pode ser utilizado!}$  Ex. SMA,  $RUW = 1782 \text{ kg/m}^3$

$CUW \text{ CA} = \text{valor escolhido em função do tipo de mistura (\%)}$ . Ex. SMA,  $CUW \text{ CA} = 118\%$

$CA = RUW \times CUW \text{ CA}$ . Ex.  $CA = 1782 \times 1,18 = 2102,8 \text{ kg/m}^3$

Massa de CA, kg = CA, em kg. Ex. 2102,8 kg

**Passo 2:** determinar os vazios da fração graúda, CA, no peso unitário escolhido, CUW

CA,  $\text{kg/m}^3$ . Ex.  $CA = 2102,8 \text{ kg/m}^3$

Gsb CA. Ex.  $Gsb \text{ CA} = 3,399$

Solid Volume, SV,  $\text{m}^3 = CA / (Gsb \text{ CA} \times 1000)$ . Ex.  $SV = 2102,8 / (3,399 \times 1000) = 0,619 \text{ m}^3$

Voids Volume, VV,  $\text{m}^3 = 1 - SV$ . Ex.  $VV = 1 - 0,619 = 0,381 \text{ m}^3$

Voids, % = Solid Volume  $\times 100$ . Ex.  $\% \text{ Voids} = 0,381 \times 100 = 38,1\%$



Passo 3: determinar o peso por unidade de volume de fração miúda, FA, para preencher os vazios da fração graúda compactada, RUW FA.

**Importante:** Apenas para misturas do tipo SMA deve ser considerado 100% LUW. Para os outros tipos de misturas deve ser considerado 100% RUW!

RUW FA = misturas densas

LUW FA = misturas tipo SMA. Ex.  $LUW\ FA = 1730\ kg/m^3$

Massa da fração miúda, kg = Voids Volume ( $m^3$ ) x RUW FA ( $kg/m^3$ ).

Ex.  $Massa\ FA = 0,381 \times 1730 = 659,1\ kg$

Passo 4: determinar as porcentagens de CA e FA por peso

Ex.  $Massa\ de\ CA = 2102,8\ kg$

$Massa\ de\ FA = 659,1\ kg$

Total = CA + FA (peso total da mistura de agregados, kg). Ex.  $Total = 2102,8 + 659,1 = 2761,9\ kg$

%CA = (peso do CA, kg/peso total da mistura de agregados, kg) x 100. Ex.  $\%CA = (2102,8/2761,9) \times 100 = 76,1\%$

%FA = (peso do FA, kg/peso total da mistura de agregados, kg) x 100. Ex.  $\%FA = (659,1/2761,9) \times 100 = 23,9\%$

Passo 5: determinar as porcentagens de material de tamanho oposto ("opposite" sized material, OSM) de cada "pilha" de material, ou seja, determinar a % de material graúdo no FA e de material miúdo no CA. A partir da PCS, determinar as porcentagens passantes dos agregados graúdos, CA, e miúdos, FA, correspondentes:

Para o CA, a % de material de tamanho oposto corresponde a própria % passante na PCS.

Ex. 6,2%

Para o FA, a % de material de tamanho oposto corresponde a (100% - % passante na PCS).

Ex.  $100 - 98,9 = 1,1\%$

%OSM CA = %CA x %PCS. Ex.  $\%OSM\ CA = 76,1 \times 0,062 = 4,7\%$

%OSM FA = %FA x (100% - %PCS). Ex.  $\%OSM\ FA = 23,9 \times 0,011 = 0,3\%$

Passo 6: fazer a correção das % de cada material, %CA' e %FA', em função da %OSM

$\%CA' = (\%CA + \%OSM\ CA) - \%OSM\ FA$ . Ex.  $\%CA' = (76,1 + 4,7) - 0,3 = 80,5\%$

$\%FA' = (\%FA + \%OSM\ FA) - \%OSM\ CA$ . Ex.  $\%FA' = (23,9 + 0,3) - 4,7 = 19,5\%$

Passo 7: Determinar a % total de material passante na peneira 0,075 mm (#200), correspondente a soma das frações existentes no CA e no FA. A partir dos valores corrigidos de %CA' e %FA', determinar a % total de material passante na peneira 0,075 mm

% passante na peneira 0,075 mm do CA = %CA' x % passante na peneira 0,075 mm do CA.

Ex.  $CA = 80,56 \times 0,014 = 1,1\%$

% passante na peneira 0,075 mm do FA = %FA' x % passante na peneira 0,075 mm do FA.

Ex.  $FA = 19,44 \times 0,143 = 2,8\%$

% total de material passante na peneira 0,075 mm = % passante na peneira 0,075 mm do CA + % passante na peneira 0,075 mm do FA.

Ex.  $\% total\ de\ material\ passante\ na\ peneira\ 0,075\ mm = 1,1 + 2,8 = 3,9\%$

Passo 8: Determinar a % de filer mineral, MF, necessário para completar a % desejada (target) na mistura de material passante na peneira 0,075 mm

Ex.  $\% target = 9\%$



% MF = % target - % total de material passante na peneira 0,075 mm.

Ex. % MF = 9,0% - 3,9% = 5,1%

Portanto, % MF' = % MF / % passante na peneira 0,075 mm do filer mineral, MF.

Ex. Filer mineral = CAL

% passante na peneira 0,075 mm da CAL = 91,5%

% MF' = 5,1/0,915 = 5,6%

**Passo 9: Determinar as % finais de cada material por peso**

Fazer a correção apenas da % de FA, em função da quantidade de filer mineral, MF, que será adicionado.

%FA'' = %FA' - %MF'. Ex. %FA'' = 19,5 - 5,6 = 13,9%

Ex. %CA<sub>final</sub> = %CA' = 80,5%

%FA<sub>final</sub> = %FA'' = 13,9%

%MF<sub>final</sub> = %MF' = 5,6%

Peneira		Escória		Pó de pedra		Filer mineral, MF		Curva	Faixa 19,0 mm	
#	mm	% Passada	80,5	% Passada	13,9	% Passada	5,6		mínimo	máximo
1"	25,0	100	80,5	100	13,9	100	5,6	100,0	100	100
3/4"	19,0	95,8	77,1	100	13,9	100	5,6	96,6	90	100
1/2"	12,5	69,2	55,7	100	13,9	100	5,6	75,2	50	88
3/8"	9,5	35	28,2	100	13,9	100	5,6	47,7	25	60
Nº 4	4,75	6,2	5,0	98,9	13,7	100	5,6	24,3	20	28
Nº 8	2,36	5,5	4,4	80,2	11,1	100	5,6	21,2	16	24
Nº 16	1,18	5,3	4,3	58,4	8,1	100	5,6	18,0		
Nº 30	0,60	5	4,0	47,7	6,6	100	5,6	16,3		
Nº 50	0,30	4,5	3,6	36,4	5,1	100	5,6	14,3		
Nº 100	0,15	3,1	2,5	24,2	3,4	91,5	5,1	11,0		
Nº 200	0,075	1,4	1,1	14,3	2,0	91,5	5,1	8,2	8	11

**Passo 10: Definição das peneiras de controle.**

Peneiras		NMAS = 19,0 mm
Controle	mm	% passante
Half Sieve	9,5	47,7
PCS	4,75	24,3
SCS	1,18	18,0
TCS	0,30	14,3

**Passo 11: Avaliação do comportamento da mistura de agregados**

- Se **49,9% ou menos** da mistura de materiais passa na PCS, considera-se gráuda, CA;
- Se **50% ou mais** da mistura de materiais passa na PCS, considera-se miúda, FA.

Ex. Como a % passante na PCS = 24,3% é menor que 49,9%, a mistura tem comportamento gráuda!

**Passo 12: Cálculo das proporções. Ex.**

Proporção		Valores obtidos	Limites
CA	$CA = \frac{\% \text{ passante na HS} - \% \text{ passante na PCS}}{100 - \% \text{ passante na HS}}$	0,45 – ok!	0,35-0,50
FAc	$FAc = \frac{\% \text{ passante na SCS}}{\% \text{ passante na PCS}}$	0,74 – ok!	0,60-0,85
FAf	$FAf = \frac{\% \text{ passante na TCS}}{\% \text{ passante na SCS}}$	0,79 – ok!	0,65-0,90



## PROCEDIMENTO 2 – VERIFICAÇÃO DO INTERTRAVAMENTO DOS AGREGADOS DE UMA MISTURA CONHECIDA

Para a análise do intertravamento dos agregados pelo método Bailey devem ser realizadas as seguintes atividades:

- Preparação e peneiramento dos materiais;
- Determinação das massas específicas solta e compactada dos agregados secos.

### 1 - Preparação dos Materiais

- Para determinar a granulometria dos agregados, a quantidade de material para realizar o peneiramento deve atender a ASTM C 136-06. No caso de agregados miúdos, a quantidade mínima requerida é de 300 g de material seco. O tamanho da amostra de agregados graúdos secos deve atender a tabela 6.

Tabela 6: Quantidade de material mínima em função do NMAS

Peneira		Quantidade de material mínima, kg
#	mm	
3/8"	9,5	1
1/2"	12,5	2
3/4"	19,0	5
1"	25,0	10
1 1/2"	37,5	15
2"	50,0	20
2 1/2"	63,0	35
3"	75,0	60
3 1/2"	90,0	100
4"	100,0	150
5"	125,0	300

- Preparar no mínimo 3 amostras de cada tipo de agregado;
- Secar as amostras de agregados em estufa a temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

### 2 - Peneiramento dos materiais

Segundo recomendação do *Asphalt Institute*, o peneiramento dos agregados pode ser realizado com auxílio de um peneirador automático, da seguinte forma:

- Agregado graúdo: 4 minutos no peneirador automático;
- Agregado miúdo: 6 minutos no peneirador automático.

A quantidade de material a ser colocada por vez no peneirador varia de acordo com o NMAS, devendo ser atendida a norma ASTM 136-06.

- Os agregados secos devem ser passados nas seguintes peneiras:

Peneira	
#	mm
1"	25,0
3/4"	19,0
1/2"	12,5
3/8"	9,5
1/4"	6,25
Nº 4	4,75
Nº 8	2,36
Nº 16	1,18
Nº 30	0,60
Nº 50	0,30
Nº 100	0,15
Nº 200	0,075



- Após o peneiramento dos materiais, fazer a composição da mistura de agregados;
- Determinar o tamanho máximo nominal, NMAS, da mistura de agregados;
- Determinar as peneiras de controle da mistura de agregados: HS, PCS, SCS e TCS;
- Verificar se a mistura de agregados tem comportamento graúdo (CA) ou miúdo (FA);
- Determinar as seguintes proporções: CA, Fac e Faf;
- Verificar se a mistura atende os limites das proporções em função do tipo de comportamento: CA ou FA;
- No caso de misturas de comportamento fino, devem ser determinadas novas peneiras de controle, assim como as porcentagens passantes das novas peneiras e as novas proporções correspondentes: CA, Fac e Faf.

### 3 - Determinação das massas específicas solta e compactada dos agregados secos – AASHTO T 19/09

O volume de agregado de cada amostra deve ser no mínimo duas vezes o correspondente à capacidade do recipiente a ser utilizado. O recipiente deve ser um molde cilíndrico de metal resistente (*metal bucket*) com as seguintes dimensões:

Agregado	NMAS, mm	Diâmetro, mm	Altura, mm
CA	$\geq 19,0$	250	200
	4,75 a 19,0	250	150
FA	$\leq 4,75$	Cilindro de Proctor	

#### 3.1 - Aferição do recipiente

- Pesar o recipiente seco, assim como a placa de vidro, que também deve estar seca. As pesagens devem ser efetuadas com aproximação de  $\pm 0,2\%$  das massas a determinar;
- Encher o recipiente com água à temperatura ambiente e cobrir com uma placa de vidro plano de modo que não fiquem bolhas de ar;
- Limpar cuidadosamente a água extravasada e determinar o peso do conjunto;
- Retirar a placa de vidro e determinar a temperatura da água em graus Celsius;
- A capacidade do recipiente, expressa em  $\text{cm}^3$ , é dada pelo quociente da diferença das massas determinadas, expressas em gramas, pelo valor da massa específica da água considerado igual a  $1,00 \text{ g/cm}^3$ , na faixa de variação de temperatura de  $22 \pm 10^\circ\text{C}$ .

#### 3.2 - Determinação da massa específica aparente em estado solto, $G_{LUW}$

- Encher o recipiente com o auxílio de uma concha ou pá, de forma que não ocorra a queda dos agregados, ou seja, o material deve ser depositado cuidadosamente dentro do recipiente até sobrar material acima da superfície do recipiente. Nivelar a superfície com a haste de socamento, de tal maneira que as pequenas protuberâncias dos grãos maiores de agregado compensem os maiores vazios abaixo do plano da borda do recipiente. Deve ser tomado cuidado para evitar uma eventual segregação das partículas que constituem a amostra, assim como a compactação dos agregados.
- Em seguida, o recipiente deve ser pesado com o material nele contido. A massa de agregado solto é a diferença entre a massa do recipiente cheio e a massa do recipiente vazio.
- A massa específica aparente em estado solto,  $G_{LUW}$ , será obtida dividindo-se a massa do agregado pelo volume do recipiente, expresso em  $\text{g/cm}^3$ , com aproximação de  $0,01 \text{ g/cm}^3$ , e deverá ser a média dos resultados individuais obtidos em pelo menos três determinações. Estes resultados individuais não devem apresentar desvios, em relação à média, maiores do que 1%.



### 3.3 - Determinação da massa específica aparente em estado compactado, $G_{RUW}$

- Encher o recipiente até 1/3 do volume e nivelar a superfície com as mãos. Aplicar 25 golpes com uma haste de socamento, distribuídos uniformemente sobre a superfície. Encher o 2º terço do volume e repetir a operação descrita anteriormente. Finalmente, encher a 3ª camada até sobrar material acima da superfície do recipiente e repetir a operação. Nivelar a superfície com a haste de socamento, de tal maneira que as pequenas protuberâncias dos grãos maiores de agregado compensem os maiores vazios abaixo do plano da borda do recipiente.
- A haste de socamento deve ser uma barra de aço reta, com cerca de 600 mm de comprimento, 16 mm de diâmetro e extremidade semi-esférica com o mesmo diâmetro.
- Durante a compactação, os golpes da 1ª camada não devem atingir o fundo do recipiente. Na compactação das 2ª e 3ª camadas, a haste de socamento não deve penetrar na camada subjacente já compactada.
- Em seguida, o recipiente deve ser pesado com o material nele contido. A massa do agregado será a diferença entre a massa do recipiente cheio e a massa do recipiente vazio.
- A massa específica aparente em estado compactado,  $G_{RUW}$ , será obtida dividindo-se a massa do agregado pelo volume do recipiente, expresso em  $\text{g}/\text{cm}^3$ , com aproximação de  $0,01 \text{ g}/\text{cm}^3$ , e deverá ser a média dos resultados individuais obtidos em pelo menos três determinações. Estes resultados individuais não devem apresentar desvios, em relação à média, maiores do que 1%.

### 4 - Determinação dos vazios da fração graúda do agregado compactado, $VCA_{RUW}$

Após a determinação da PCS, separar a quantidade material de acordo com o item 3 e passar pela PCS. Vale ressaltar que o material a ser utilizado é correspondente a mistura dos agregados, ou seja, misturar a quantidade de cada material de acordo com a composição da mistura de agregados determinada anteriormente. Para determinar a massa específica da fração graúda do agregado compactado utilizar apenas o material que fica retido na PCS. Repetir o item 3.3 e calcular o  $VCA_{RUW}$ .



## PLANILHAS

## Análise granulométrica

Abertura das Peneiras		Massa Retida (g)			% Retida			% Passante			
#	mm	AM01	AM02	AM03	AM01	AM02	AM03	AM01	AM02	AM03	Média
1"	25,0										
3/4"	19,0										
1/2"	12,5										
3/8"	9,5										
1/4"	6,25										
Nº 4	4,75										
Nº 8	2,36										
Nº 16	1,18										
Nº 30	0,60										
Nº 50	0,30										
Nº 100	0,15										
Nº 200	0,075										
Fundo											
Total											

Peneiras		% Passante				Faixa selecionada	
#	mm	Material 1	Material 2	Material 3	Curva granulométrica	mínimo	máximo
1"	25,0						
3/4"	19,0						
1/2"	12,5						
3/8"	9,5						
1/4"	6,25						
Nº 4	4,75						
Nº 8	2,36						
Nº 16	1,18						
Nº 30	0,60						
Nº 50	0,30						
Nº 100	0,15						
Nº 200	0,075						
NMAS							

## Determinação das peneiras de controle

Peneiras		
Controle	mm	% Passante
HS		
PCS		
SCS		
TCS		

## Determinação das proporções

Limites	Proporções	Valores calculados
	CA	
	FAC	
	FAF	



#### Determinação das porcentagens passantes das novas peneiras de controle dos agregados de comportamento fino

Peneiras		
Controle	mm	% Passante
PCS original		100
HS nova		
PCS nova		
SCS nova		
TCS nova		

#### Determinação das proporções das novas peneiras de controle dos agregados de comportamento fino

Limites	Proporções	Valores calculados
	CA	
	FAc	
	FAf	

#### Determinação da massa específica aparente

Peso do recipiente = (1) g  
 Peso do recipiente + vidro = (2) g  
 Peso do recipiente + vidro + água = (3) g  
 Volume do recipiente = (3) – (2) = (4) cm<sup>3</sup>

#### Massa específica aparente em estado solto, $G_{LUW}$ – Loose Unit Weight (LUW)

Massa de agregados + recipiente = (5) g  
 Massa de agregados = (5) – (1) = (6) g  
 $G_{LUW}$  = massa de agregados/volume = (6)/(4) g/cm<sup>3</sup>

#### Massa específica aparente em estado compactado, $G_{RUW}$ – Rodded Unit Weight (RUW)

Massa de agregados + recipiente = (7) g  
 Massa de agregados = (7) – (1) = (8) g  
 $G_{RUW}$  = massa de agregados/volume = (8)/(4) g/cm<sup>3</sup>

#### Determinação dos vazios da fração graúda de agregados

##### Vazios do agregado em estado solto, $VCA_{LUW}$

$$VCA_{LUW} = \left( 1 - \frac{G_{LUW}}{G_{sb} \times G_w} \right) \times 100$$

onde:

$LUW$  = Peso unitário solto = massa/volume  
 $VCA_{LUW}$  = vazios do agregado em estado solto, em %  
 $G_{LUW}$  = massa específica aparente em estado solto, em g/cm<sup>3</sup>  
 $G_{sb}$  = massa específica aparente da fração graúda do agregado, em g/cm<sup>3</sup>  
 $G_w$  = massa específica da água (0,998 g/cm<sup>3</sup>)

##### Vazios do agregado em estado compactado, $VCA_{RUW}$

$$VCA_{RUW} = \left( 1 - \frac{G_{RUW}}{G_{sb} \times G_w} \right) \times 100$$

onde:

$RUW$  = Peso unitário compactado  
 $VCA_{RUW}$  = vazios do agregado em estado compactado, em %  
 $G_{RUW}$  = massa específica aparente em estado compactado, em g/cm<sup>3</sup>

Para materiais de comportamento graúdo, CA

- $VCA_{LUW}$  varia de 43 a 49%
- $VCA_{RUW}$  varia de 37 a 43%



Para materiais de comportamento **fino**, FA

- $VCA_{LUW}$  varia de 35 a 43%
- $VCA_{RUW}$  varia de 28 a 36%

Vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada,  $VCA_{mix}$

$$VCA_{mix} = 100 - \left( \frac{G_{mb}}{G_{sb-g}} \times P_{CA} \right)$$

onde:

$VCA_{mix}$  = vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada, %

$G_{mb}$  = massa específica aparente da mistura compactada, g/cm<sup>3</sup>

$G_{sb-g}$  = massa específica aparente da fração graúda do agregado, g/cm<sup>3</sup>

$P_{CA}$  = % de fração graúda do agregado em relação ao peso total da mistura

Se  $VCA_{RUW} > VCA_{mix} \Rightarrow$  comportamento graúdo da mistura

Se  $VCA_{RUW} < VCA_{mix} \Rightarrow$  comportamento fino da mistura



## **Anexo 2: Aula Prática sobre Método Bailey**

### **EXERCÍCIO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO BAILEY NA ANÁLISE DE AGREGADOS**

AULA PRÁTICA – Aplicação do Método Bailey na Análise Granulométrica e Determinação das Proporções de Agregados para Mistura do Tipo SMA

**GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS**

Peneiras		% Passante				
#	mm	Brita 1	Brita 5/8	Pedrisco	Pó de pedra	CAL
1"	25,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
¾"	19,0	99,4	100,0	100,0	100,0	100,0
½"	12,5	59,7	84,0	100,0	100,0	100,0
3/8"	9,5	28,5	56,7	93,7	100,0	100,0
¼"	6,25	10,5	20,7	48,1	98,2	100,0
Nº 4	4,75	7,2	8,0	26,0	90,3	100,0
Nº 8	2,36	4,5	1,8	9,8	67,7	100,0
Nº 16	1,18	3,5	1,4	5,4	58,6	100,0
Nº 30	0,60	2,9	1,3	4,2	43,8	100,0
Nº 50	0,30	2,5	1,3	3,6	33,4	95,0
Nº 100	0,15	1,8	1,0	2,6	21,6	95,0
Nº 200	0,075	1,5	0,8	2,2	13,5	95,0
<b>NMAS</b>						-
<b>Gsb</b>						

**PENEIRAS DE CONTROLE**

Peneiras de controle	Brita 1	Brita 5/8	Pedrisco	Pó de pedra
HS				
PCS				
SCS				
TCS				
Classificação (CA ou FA)				

**MASSA ESPECÍFICA APARENTE EM ESTADO SOLTO (LUW)**

	MASSA DO RECIPIENTE + AGREGADOS			MASSA DOS AGREGADOS	LUW (kg/m³)
<b>AGREGADOS</b>	TESTE 1	TESTE 2	MÉDIA		
<b>BRITA 1</b>					
<b>BRITA 5/8</b>					
<b>PEDRISCO</b>					
<b>PÓ-DE- PEDRA</b>					

**MASSA ESPECÍFICA APARENTE EM ESTADO COMPACTADO (RUW)**

	MASSA DO RECIPIENTE + AGREGADOS			MASSA DOS AGREGADOS	RUW (kg/m³)
<b>AGREGADOS</b>	TESTE 1	TESTE 2	MÉDIA		
<b>BRITA 1</b>					
<b>BRITA 5/8</b>					
<b>PEDRISCO</b>					
<b>PÓ-DE- PEDRA</b>					

## PROCEDIMENTO 1

### MATERIAIS EMPREGADOS: PEDRISCO + PÓ DE PEDRA + MF

**Passo 1:** determinar o peso por unidade de volume (massa) da contribuição da fração graúda, CA, (em relação a % do peso unitário escolhido da fração graúda e a mistura de CA por volume).

$$CA = RUW \text{ ou } LUW \text{ (Apenas um CA pode ser utilizado! ) } \rightarrow CA = \quad \rightarrow RUW \text{ ou } LUW = \quad \text{kg/m}^3$$

CUW CA = valor escolhido em função do tipo de mistura (%) =

$$CA = RUW \times CUW \text{ CA ou } LUW \times CUW = \quad \text{kg/m}^3$$

$$\text{Massa de CA, kg} = CA, \text{ em kg} = \quad \text{kg}$$

**Passo 2:** determinar os vazios da fração graúda, CA, no peso unitário escolhido, CUW

$$CA, \text{ kg/m}^3 = \quad \text{kg/m}^3$$

$$Gsb \text{ CA} = \quad \text{kg/m}^3$$

$$\text{Solid Volume, SV, m}^3 = CA / (Gsb \text{ CA} \times 1000) =$$

$$\text{Voids Volume, VV, m}^3 = 1 - SV =$$

$$\text{Voids, \%} = \text{Solid Volume} \times 100 =$$

**Passo 3:** determinar o peso por unidade de volume de fração miúda, FA, para preencher os vazios da fração graúda compactada, RUW FA ou LUW FA.

**Importante:** Apenas para misturas do tipo SMA deve ser considerado 100% LUW. Para os outros tipos de misturas deve ser considerado 100% RUW!

$$LUW = \quad \text{kg/m}^3$$

$$\text{Massa da fração miúda, kg} = \text{Voids Volume (m}^3\text{)} \times LUW \text{ FA ou } RUW \text{ FA (kg/m}^3\text{)} = \quad \text{kg}$$

**Passo 4:** determinar as percentagens de CA e FA por peso:

$$\text{Massa de CA} = \quad \text{kg}$$

$$\text{Massa de FA} = \quad \text{kg}$$

$$\text{Total} = CA + FA \text{ (peso total da mistura de agregados, kg)} = \quad \text{kg}$$

$$\%CA = (\text{peso do CA, kg} / \text{peso total da mistura de agregados, kg}) \times 100 = \quad \%$$

$$\%FA = (\text{peso do FA, kg} / \text{peso total da mistura de agregados, kg}) \times 100 = \quad \%$$

**Passo 5:** determinar as percentagens de material de tamanho oposto (*“opposite” sized material*, OSM) de cada “pilha” de material, ou seja, determinar a % de material graúdo no FA e de material miúdo no CA. A partir da PCS, determinar as percentagens passantes dos agregados graúdos, CA, e miúdos, FA, correspondentes:

$$\text{Para o CA, a \% de material de tamanho oposto corresponde a própria \% passante na PCS} = \quad \%$$

$$\text{Para o FA, a \% de material de tamanho oposto corresponde a (100\% - \% passante na PCS)} = (100 - \quad) \%$$

$$\%OSM \text{ CA} = \%CA \times \%PCS =$$

$$\%OSM \text{ FA} = \%FA \times (100\% - \%PCS) =$$

**Passo 6:** fazer a correção das % de cada material, %CA' e %FA', em função da %OSM

$$\%CA' = (\%CA + \%OSM \text{ CA}) - \%OSM \text{ FA} =$$

$$\%FA' = (\%FA + \%OSM \text{ FA}) - \%OSM \text{ CA} =$$

**Passo 7:** Determinar a % total de material passante na peneira 0,075 mm (#200), correspondente a soma das frações existentes no CA e no FA. A partir dos valores corrigidos de %CA' e %FA', determinar a % total de material passante na peneira 0,075 mm

% passante na peneira 0,075 mm do CA = %CA' x % passante na peneira 0,075 mm do CA

=

% passante na peneira 0,075 mm do FA = %FA' x % passante na peneira 0,075 mm do FA

=

% total de material passante na peneira 0,075 mm = % passante na peneira 0,075 mm do CA + % passante na peneira 0,075 mm do FA =

**Passo 8:** Determinar a % de fíler mineral, MF, necessário para completar a % desejada (target) na mistura de material passante na peneira 0,075 mm. % target = %

% MF = % target - % total de material passante na peneira 0,075 mm = %

Portanto, % MF' = % MF / % passante na peneira 0,075 mm do fíler mineral, MF.

% passante na peneira 0,075 mm do MF =

% MF' =

**Passo 9:** Determinar as % finais de cada material por peso

Fazer a correção apenas da % de FA, em função da quantidade de fíler mineral, MF, que será adicionado.

%FA'' = %FA' - %MF' =

%CA<sub>final</sub> = %CA' =

%FA<sub>final</sub> = %FA'' =

%MF<sub>final</sub> = %MF' =

Peneira		PEDRISCO		PÓ DE PEDRA		Fíler mineral, MF		Curva	Faixa 9,5 mm	
#	mm	% Passada		% Passada		% Passada			mínimo	máximo
1"	25,0	100,0		100,0		100,0			100	100
3/4"	19,0	100,0		100,0		100,0			100	100
1/2"	12,5	100,0		100,0		100,0			90	100
3/8"	9,5	93,7		100,0		100,0			70	95
1/4"	6,25	48,1		98,2		100,0				
Nº 4	4,75	26,0		90,3		100,0			30	50
Nº 8	2,36	9,8		67,7		100,0			20	30
Nº 16	1,18	5,4		58,6		100,0				21
Nº 30	0,60	4,2		43,8		100,0				18
Nº 50	0,30	3,6		33,4		95,0				15
Nº 100	0,15	2,6		21,6		95,0				
Nº 200	0,075	2,2		13,5		95,0			8	12

**Passo 10:** Definição das peneiras de controle.

Peneiras		NMAS =
Controle	mm	% passante
Half Sieve		
PCS		
SCS		
TCS		

**Passo 11:** Avaliação do comportamento da mistura de agregados

- Se **49,9% ou menos** da mistura de materiais **passa na PCS**, considera-se **graúda, CA**;
- Se **50% ou mais** da mistura de materiais **passa na PCS**, considera-se **miúda, FA**.

**Passo 12:** Cálculo das proporções

Proporção		Valores obtidos	Limites para mistura SMA – faixa 9,5 mm
CA	$CA = \frac{\% \text{ passante na HS} - \% \text{ passante na PCS}}{100 - \% \text{ passante na HS}}$		0,15-0,30
FAc	$FAc = \frac{\% \text{ passante na SCS}}{\% \text{ passante na PCS}}$		0,60-0,85
FAf	$FAf = \frac{\% \text{ passante na TCS}}{\% \text{ passante na SCS}}$		0,65-0,90

### **Anexo 3: Planilha do Método Bailey**

#### **EXEMPLO DE PLANILHA UTILIZADA NO CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO MÉTODO BAILEY**

Procedimento 1 – SELEÇÃO DA GRANULOMETRIA DE UMA NOVA MISTURA			
Para determinar a granulometria de uma nova mistura combinada de agregados são necessários os seguintes dados:			
§ curva granulometria de cada material (agregados e filer mineral, MF);			
§ peneiras de controle: PCS;			
§ peso unitário solto, LUW;			
§ peso unitário compactado, RUW;			
§ massa específica aparente dos agregados, $G_{sb}$ ( <i>bulk specific gravity</i> ), em $g/cm^3$ .			
Inicialmente, deve escolhido um peso unitário, CUW ( <i>Chosen Unit Weight</i> ), de cada agregado, correspondente a uma porcentagem do peso unitário solto (LUW) ou compactado (RUW), dependendo do tipo de mistura:			
§ misturas de comportamento graúdo, o CUW varia de 95% a 105% do LUW;			
§ misturas de comportamento fino, o CUW varia de 60% a 85% do LUW;			
§ misturas do tipo SMA, o CUW variando de 110 a 125% do RUW.			
Recomenda-se sempre começar com um valor médio da % do peso unitário solto, ou seja, para misturas de comportamento graúdo usar 100%, para misturas de comportamento fino usar 73% e para misturas do tipo SMA adotar 118%.			
Um aumento ou diminuição no valor de CUW CA resulta em um aumento ou diminuição do volume da fração graúda da mistura combinada.			
§ Se o CUW CA aumenta, a mistura combinada fica mais graúda.			
§ Se o CUW CA diminui, a mistura combinada fica mais fina.			
Uma mudança de 10% no valor de CUW CA para qualquer tipo de mistura, geralmente, altera a porcentagem passante na PCS da mistura combinada de 4 a 5%.			
Quando adequado, deve ser indicado a % passante na peneira 0,075 mm (#200) desejada (% <i>target</i> ), em função do tipo de mistura asfáltica que será executada. Por exemplo, no caso de misturas do tipo SMA, esse valor deve estar entre 8 e 11% (AASHTO MP 325-08), sendo importante considerar como desejado o valor de 8% (que é a mínima para esse tipo de mistura). <i>Ex. Target = 8%</i>			
		Preencher as células amarelas	
Passo 1: determinar o peso por unidade de volume (massa) da contribuição da fração graúda, CA, (em relação a % do peso unitário escolhido da fração graúda e a mistura de CA por volume).		SMA	Escória + pó de pedra
CA = RUW ou LUW ( $kg/m^3$ ) – <b>Apenas um CA pode ser utilizado!</b> <i>Ex. SMA, RUW = 1754 <math>kg/m^3</math></i>		RUW =	1782 $kg/m^3$
CUW CA = valor escolhido em função do tipo de mistura. <i>Ex. SMA, CUW CA = 118%</i>		CUW CA =	118 %
CA = RUW x CUW CA. <i>Ex. CA = 1754 x 1,18 = 2070 <math>kg/m^3</math></i>		CA =	2103 $kg/m^3$
Massa de CA, kg = CA, em kg. <i>Ex. 2070 kg</i>		Massa de CA =	2103 kg
Passo 2: determinar os vazios da fração graúda no peso unitário escolhido, CUW			
CA, $kg/m^3$ . <i>Ex. CA = 2070 <math>kg/m^3</math></i>			
$G_{sb}$ CA. <i>Ex. <math>G_{sb}</math> CA = 3,399</i>		$G_{sb}$ =	2,929 $kg/m^3$
Solid Volume, SV, $m^3$ = CA/( $G_{sb}$ CA x 1000). <i>Ex. SV = 2070/(3,399x1000) = 0,609 <math>m^3</math></i>		SV =	0,718 $m^3$
Voids Volume, VV, $m^3$ = 1 – SV. <i>Ex. VV = 1 – 0,609 = 0,391 <math>m^3</math></i>		VV =	0,282
Voids, % = Solid Volume x 100. <i>Ex. % Voids = 0,391 x 100 = 39,1%</i>		%Voids =	28,2
Passo 3: determinar o peso por unidade de volume de fração miúda, FA, para preencher os vazios da fração graúda compactada. <b>Importante:</b> <i>Apenas para misturas do tipo SMA deve ser considerado 100% LUW. Para os outros tipos de misturas deve ser considerado 100% RUW!</i>			
RUW FA = misturas densas			
LUW FA = misturas tipo SMA. <i>Ex. LUW FA = 1730 <math>kg/m^3</math></i>		LUW FA =	1730,0 $kg/m^3$
Massa da fração miúda, kg = Voids Volume ( $m^3$ ) x RUW FA ( $kg/m^3$ ). <i>Ex. Massa FA = 0,391 x 1730 = 676,4 kg</i>		Massa FA =	488,0 kg

<b>Passo 4:</b> determinar as porcentagens de CA e FA por peso.							
Ex. Massa de CA = 2070 kg							
Massa de FA = 676,4 kg							
Total = CA + FA (peso total da mistura de agregados, kg).							
Ex. Total = 2070 + 676,4 = 2746,4 kg							
%CA = (peso do CA, kg/peso total da mistura de agregados, kg) x 100.							
Ex. %CA = (2070/2746,4)x100 = 75,4%							
%FA = (peso do FA, kg/peso total da mistura de agregados, kg) x 100.							
Ex. %FA = (676,4/2746,4)x100 = 24,6%							
<b>Passo 5:</b> determinar as porcentagens de material de tamanho oposto ("opposite" sized material, OSM) de cada "pilha" de material, ou seja, determinar a % de material graúdo no FA e de material miúdo no CA. A partir da PCS, determinar as porcentagens passantes dos agregados graúdos, CA, e miúdos, FA, correspondentes:							
Para o CA, a % de material de tamanho oposto corresponde a própria % passante na PCS.							
Ex. 6,2%							
Para o FA, a % de material de tamanho oposto corresponde a (100% - % passante na PCS).							
Ex. 100-98,9 = 1,1%							
%OSM CA = %CA x %PCS. Ex. %OSM CA = 75,4 x 0,062 = 4,67%							
%OSM FA = %FA x (100% - %PCS). Ex. %OSM FA = 24,6 x 0,011 = 0,27%							
<b>Passo 6:</b> fazer a correção das % de cada material, %CA' e %FA', em função da %OSM							
%CA' = (%CA + %OSM CA) - %OSM FA. Ex. %CA' = (75,4 + 4,67) - 0,27 = 79,8%							
%FA' = (%FA + %OSM FA) - %OSM CA. Ex. %FA' = (24,6 + 0,27) - 4,67 = 20,2%							
<b>Passo 7:</b> Determinar a % total de material passante na peneira 0,075 mm (#200), correspondente a soma das frações existentes no CA e no FA							
A partir dos valores corrigidos de %CA' e %FA', determinar a % total de material passante na peneira 0,075 mm							
% passante na peneira 0,075 mm do CA = %CA' x % passante na peneira 0,075 mm do CA.							
Ex. CA = 79,80 x 0,014 = 1,12%							
% passante na peneira 0,075 mm do FA = %FA' x % passante na peneira 0,075 mm do FA.							
Ex. FA = 20,20 x 0,143 = 3,71%							
% total de material passante na peneira 0,075 mm = % passante na peneira 0,075 mm do CA + % passante na peneira 0,075 mm do FA.							
Ex. % total de material passante na peneira 0,075 mm = 1,12 + 3,71 = 4,83%							
<b>Passo 8:</b> Determinar a % de fíler mineral, MF, necessário para completar a % desejada (target) na mistura de material passante na peneira 0,075 mm							
Ex. % target = 8%							
% MF = % target - % total de material passante na peneira 0,075 mm.							
Ex. % MF = 8,0% - 4,83% = 3,17%							
Portanto, % MF' = % MF / % passante na peneira 0,075 mm do fíler mineral, MF.							
Ex. Fíler mineral = CAL							
% passante na peneira 0,075 mm da CAL = 91,5%							
% MF' = 3,17/0,915 = 3,46%							
<b>Passo 9:</b> Determinar as % finais de cada material por peso							
Fazer a correção apenas da % de FA, em função da quantidade de fíler mineral, MF, que será adicionado.							
%FA'' = %FA' - %MF'. Ex. %FA'' = 20,20 - 3,46 = 16,74%							
Ex.							
%CA <sub>final</sub> = %CA' = 79,80%							
%FA <sub>final</sub> = %FA'' = 16,74%							
%MF <sub>final</sub> = %MF' = 3,46%							

Pedrisco + Pó de pedra										
Peneira		Pedrisco		Pó de pedra		Cal		Curva	Faixa 9,5 mm	
#	mm	% Passada	78,2	% Passada	15,7	% Passada	6,2	100,0	mínimo	máximo
1"	25,4	100,0	78,2	100,0	15,7	100,0	6,2	100,0	100	100
3/4"	19,0	100,0	78,2	100,0	15,7	100,0	6,2	100,0	100	100
1/2"	12,5	100,0	78,2	100,0	15,7	100,0	6,2	100,0	90	100
3/8"	9,5	93,7	73,3	100,0	15,7	100,0	6,2	95,1	70	95
¼"	6,25	48,1	37,6	98,2	15,4	100,0	6,2	59,2		
Nº 4	4,75	26,0	20,3	90,3	14,2	100,0	6,2	40,7	30	50
Nº 8	2,36	9,8	7,6	67,7	10,6	100,0	6,2	24,4	20	30
Nº 16	1,18	5,4	4,2	58,6	9,2	100,0	6,2	19,6		21
Nº 30	0,60	4,2	3,3	43,8	6,9	100,0	6,2	16,3		18
Nº 50	0,30	3,6	2,8	33,4	5,2	99,9	6,2	14,2		15
Nº 100	0,150	2,6	2,0	21,6	3,4	98,7	6,1	11,5		
Nº 200	0,075	2,2	1,7	13,5	2,1	88,5	5,5	9,3	8	12

Determinação das peneiras de controle		
Peneiras		NMAS = 9,5
Controle	mm	% Passante
HS	4,75	40,7
PCS	2,36	24,4
SCS	0,60	16,3
TCS	0,15	11,5

Determinação das proporções		
Limites	Proporções	Valores calculados
0,15-0,30	CA	0,27
0,60-0,85	FAC	0,67
0,65-0,90	FAf	0,70

## **Anexo 4: Dosagem Superpave**

### **MÉTODO DE DOSAGEM SUPERPAVE**

## METODOLOGIA SUPERPAVE – PROGRAMA SHRP

De 1985 até 1993, o FHWA (*Federal Highway Administration*) financiou um projeto de pesquisa denominado SHRP (*Strategic Highway Research Program*), onde foram investidos cerca de US\$ 150 milhões. Esse programa foi desenvolvido em parceria com um conjunto de universidades americanas e órgãos governamentais e o produto final do SHRP, denominado SUPERPAVE<sup>TM</sup> (*SUperior PERformance Asphalt PAVements*), envolve um novo sistema de especificação e seleção de materiais e projeto de mistura asfáltica.

O sistema SUPERPAVE é o único que se baseia no grau de desempenho (PG – *Performance Grade*) do material para especificação do ligante, sob as **condições climáticas** e de **tráfego específicas**. O desempenho é apresentado por dois valores, o grau de alta e de baixa temperatura. Além disso, devem ser feitas considerações adicionais em relação ao tráfego, como volume e tempo de aplicação de carga, selecionando um ligante com PG superior ao especificado (ASPHALT INSTITUTE, 2011).

Na pesquisa realizada pelo SHRP, várias mudanças foram realizadas no método de dosagem de misturas asfálticas. Foi proposta uma metodologia distinta que consiste basicamente em estimar um teor provável de projeto através da fixação do volume de vazios e do conhecimento da granulometria dos agregados disponíveis. A maior diferença entre a metodologia Superpave e o Marshall é a forma de compactação. Enquanto na dosagem Marshall, a compactação é feita por impacto (golpes), na dosagem Superpave é realizada por amassamento (giros), empregando um compactador giratório. Além disso, o método Superpave considera como parâmetros para definição do teor de projeto (teor ótimo) alguns ensaios dinâmicos, assim como a análise dos materiais, empregando ensaios específicos.

Outra diferença que pode ser citada entre os dois processos é a forma de escolha da granulometria da mistura de agregados. A metodologia Superpave incluiu os conceitos de pontos de controle. Teoricamente, pareceria razoável que a melhor graduação para os agregados nas misturas asfálticas fosse aquela que fornecesse a graduação mais densa. No entanto, a graduação com maior densidade acarreta uma estabilidade superior através de maior contato entre as partículas e reduzidos vazios no agregado mineral. Porém, é necessária a existência de um espaço de vazios tal que permita que um volume suficiente de ligante seja incorporado. Isto garante durabilidade e ainda permite algum volume de vazios na mistura para evitar exsudação. Considerando essa teoria, vários investigadores propuseram faixas granulométricas para a densidade máxima. A granulometria de densidade máxima é uma linha reta que parte da origem e vai até o ponto do tamanho máximo do agregado. Uma granulometria que repouse sobre ou próxima a esta linha não permitirá a

incorporação de um volume adequado de ligante. Nas especificações Superpave para granulometria dos agregados foram acrescentados os pontos de controle que funcionam como pontos mestres onde a curva granulométrica deve passar. Eles estão no tamanho máximo nominal, um no tamanho intermediário (2,36 mm) e um nos finos (0,075 mm). A peneira de tamanho máximo nominal (NMAS) é a peneira de tamanho imediatamente acima da primeira peneira que reter mais de **10%** da mistura de agregados.

O tamanho do molde a ser utilizado na dosagem Superpave é um aspecto importante. O molde de 150,0 mm de diâmetro é o requerido nas especificações Superpave, porém o Compactador Giratório (CG) também admite moldagem de corpos de prova com 100,0 mm. No entanto, vale ressaltar que a adequação dos dois tamanhos de molde é limitada a misturas com tamanho máximo de agregado de 25,0 mm, ou menor.

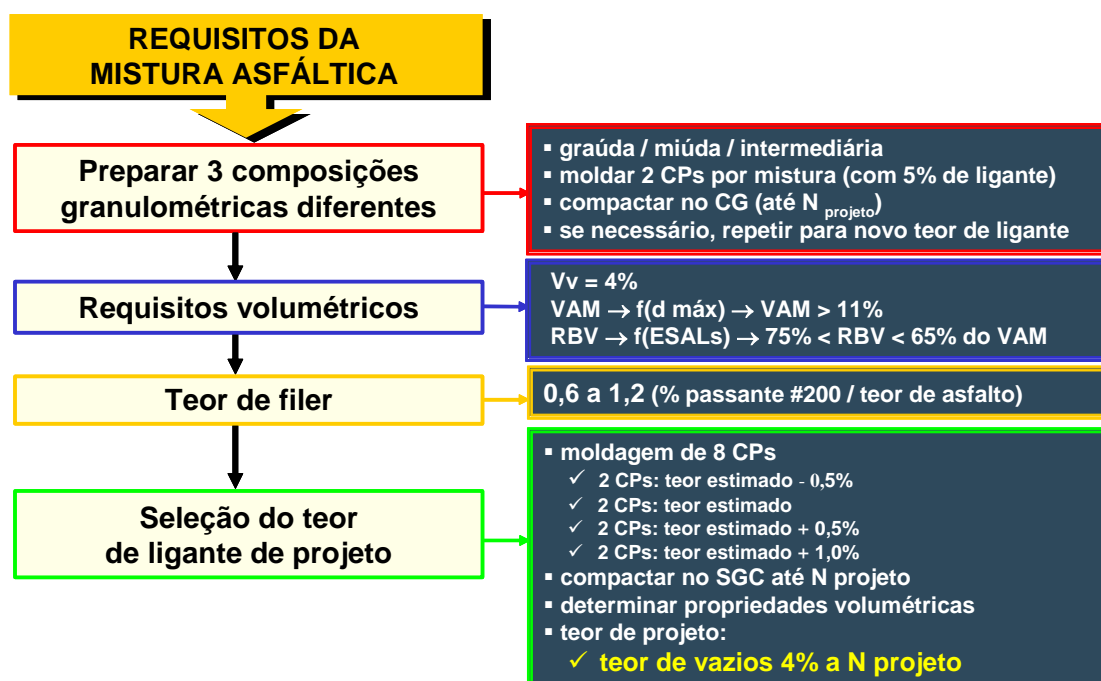
No procedimento Superpave há três níveis de projeto de mistura dependendo do tráfego e da importância da rodovia. Dependendo do tráfego, o projeto de mistura pode estar completo após o projeto volumétrico (Nível 1). Valores de tráfego (número N) sugeridos como limites entre os diferentes níveis são  $10^6$  e  $10^7$ . Nos Níveis 2 e 3, ensaios baseados em desempenho são conduzidos para otimizar o projeto a fim de resistir a falhas como deformação permanente, trincamento por fadiga e trincamento à baixa temperatura.

Tráfego	Nível de Projeto	Testes Requeridos
$ESALs \leq 10^6$	1	Projeto volumétrico
$10^6 \leq ESALs \leq 10^7$	2	Projeto volumétrico + ensaios de previsão de desempenho realizados em uma temperatura
$ESALs \geq 10^7$	3	Projeto volumétrico + ensaios de previsão de desempenho realizados em 3 temperaturas

### DOSAGEM SUPERPAVE

A dosagem Superpave de misturas asfálticas é baseada nas seguintes especificações: **AASHTO M 323 e AASHTO R 35.**

Um resumo da metodologia Superpave é apresentado em seguida.



Conforme mencionado anteriormente, antes de iniciar o procedimento de dosagem deve ser feita uma análise do local onde será aplicada a mistura, uma vez que o método leva em consideração o clima e tráfego de onde será feita a aplicação. Em seguida, deve ser feita a seleção dos materiais a serem empregados na produção da mistura asfáltica:

- Ligante: a escolha do ligante deve ser feita considerando o PG da região e do ligante. Para isso deve ser feita a classificação do PG da região onde será feita a aplicação, assim como a caracterização dos ligantes disponíveis;
- Agregados: deve ser feita análise das propriedades de consenso (angularidade dos agregados graúdo e miúdo, partículas chatas e alongadas e teor de argila), assim como determinadas a granulometria e as densidades ( $G_{sa}$  e  $G_{sb}$ ) de cada material.

PENEIRA		Material 1	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5
#	mm					
1"	25,0					
3/4"	19,0					
1/2"	12,5					
3/8"	9,5					
Nº4	4,75					
Nº8	2,36					
Nº10	2,00					
Nº16	1,18					
Nº30	0,60					
Nº50	0,30					
Nº100	0,150					
Nº200	0,075					
Gsb						
Gsa						

A composição da mistura de agregados (proporção de cada material) deve levar em conta o tipo e a especificação da mistura selecionada. Recomenda-se sempre realizar a análise do intertravamento pelo método Bailey de cada material individualmente, assim como a análise das proporções da mistura de agregados selecionada.

A composição da mistura consiste de variações das porcentagens de cada fração individual de agregado de forma a atingir uma granulometria que se enquadre na faixa que se deseje trabalhar.

Após a definição da mistura de agregados que atenda a faixa granulométrica selecionada deve ser feita uma variação das proporções de forma a produzir misturas de granulometria mais graúda e outra mais miúda, mas que continue dentro dos limites da faixa granulométrica selecionada.

Uma forma de determinar essas granulometrias é a seguinte:

- Graúda – combinada para produzir uma granulometria próxima ao critério mínimo para as peneiras de controle;
- Intermediária – combinada para produzir uma granulometria afastada dos limites impostos pelas peneiras de controle;
- Miúda – combinada para produzir uma granulometria próxima ao critério máximo para a peneira de NMAS.

**Mistura 1:** Granulometria Intermediária

PENEIRA		Material 1	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5	Mistura 1
#	mm						
1"	25,0						
3/4"	19,0						
1/2"	12,5						
3/8"	9,5						
Nº4	4,75						
Nº8	2,36						
Nº10	2,00						
Nº16	1,18						
Nº30	0,60						
Nº50	0,30						
Nº100	0,150						
Nº200	0,075						
Gsb							
Gsa							

**Mistura 2: Granulometria Graúda**

PENEIRA		Material 1	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5	Mistura 1
#	mm						
1"	25,0						
3/4"	19,0						
1/2"	12,5						
3/8"	9,5						
Nº4	4,75						
Nº8	2,36						
Nº10	2,00						
Nº16	1,18						
Nº30	0,60						
Nº50	0,30						
Nº100	0,150						
Nº200	0,075						
Gsb							
Gsa							

**Mistura 3: Granulometria Miúda**

PENEIRA		Material 1	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5	Mistura 1
#	mm						
1"	25,0						
3/4"	19,0						
1/2"	12,5						
3/8"	9,5						
Nº4	4,75						
Nº8	2,36						
Nº10	2,00						
Nº16	1,18						
Nº30	0,60						
Nº50	0,30						
Nº100	0,150						
Nº200	0,075						
Gsb							
Gsa							

**Seleção do Projeto de Estrutura do Agregado**

Para a seleção do projeto de estrutura do agregado devem ser analisadas as 3 granulometrias (intermediária, graúda e miúda) com o mesmo teor estimado de ligante, moldando-se 2 corpos de prova de cada no compactador giratório. O objetivo é selecionar a melhor granulometria, a partir da análise de seus parâmetros volumétricos.

**Passo 1:** O teor de ligante é determinado estimando-se a massa específica efetiva (Gse) da mistura de agregados:

$$Gse = Gsb + 0,8 \times (Gsa - Gsb)$$

Gsb = massa específica aparente do agregado

Gsa = massa específica real do agregado

Material	Gsb	Gsa	Gse	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3
1						
2						
3						
4						
5						
Mistura 1						
Mistura 2						
Mistura 3						

O Gsb da mistura deve ser determinado a partir da ponderação dos materiais.

**Passo 2:** Estima-se o volume de ligante absorvido (V<sub>la</sub>) pelo agregado:

$$V_{la} = \frac{P_{ag} \times (1 - V_v)}{\left(\frac{P_l}{G_l} + \frac{P_{ag}}{G_{se}}\right)} \times \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}}\right)$$

$$V_{la} \text{ M1} = \quad \text{cm}^3/\text{cm}^3$$

$$V_{la} \text{ M2} = \quad \text{cm}^3/\text{cm}^3$$

$$V_{la} \text{ M3} = \quad \text{cm}^3/\text{cm}^3$$

Onde:

V<sub>ba</sub> = V<sub>la</sub> = volume de ligante absorvido, cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> de mistura

P<sub>b</sub> = P<sub>l</sub> = porcentagem de ligante (admitido 0,05)

P<sub>s</sub> = P<sub>ag</sub> = porcentagem de agregado (admitido 0,95)

G<sub>b</sub> = G<sub>l</sub> = densidade do ligante (admitido 1,032)

V<sub>a</sub> = V<sub>v</sub> = volume de vazios (admitido 0,04 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) de mistura

**Passo 3:** Determina-se o volume de ligante efetivo (V<sub>le</sub>):

$$V_{le} = 0,081 - 0,02931 \times [\ln(TMN)]$$

TMN = tamanho máximo nominal da mistura de agregados (em polegadas).

$$V_{be} = V_{le} \text{ M1} = \quad \text{cm}^3/\text{cm}^3$$

$$V_{be} = V_{le} \text{ M2} = \quad \text{cm}^3/\text{cm}^3$$

$$V_{be} = V_{le} \text{ M3} = \quad \text{cm}^3/\text{cm}^3$$

**Passo 4:** Calcula-se a massa do agregado (M<sub>ag</sub>), em gramas

$$M_{ag} = \frac{P_{ag} \times (1 - V_v)}{\frac{P_l}{G_l} + \frac{P_{ag}}{G_{se}}}$$

Mag M1 = g

Mag M2 = g

Mag M3 = g

Ws = Mag = massa do agregado

**Passo 5:** Estima-se o teor de ligante inicial (Pli)

$$P_{li} = \frac{G_l \times (V_{le} + V_{la})}{[G_l \times (V_{le} + V_{la})] + M_{ag}} \times 100$$

Pli M1 = %

Pli M2 = %

Pli M3 = %

Adotar como teor de ligante, Pli, o valor médio das três misturas. Em seguida, um mínimo de 2 CPs para cada mistura-tentativa é compactado no SGC. Também são preparadas 2 misturas para a determinação da Densidade Máxima da mistura (Gmm). Todas as misturas devem passar por envelhecimento em estufa por 2 horas, na temperatura de compactação, antes de serem ensaiadas

O número de giros usados para compactação é determinado com base no volume de tráfego:

Parâmetros de compactação			Tráfego
N <sub>inicial</sub>	N <sub>projeto</sub>	N <sub>máximo</sub>	
6	50	75	Muito leve (local)
7	75	115	Médio (rodovias coletoras)
8	100	160	Médio a alto (vias principais e rodovias rurais)
9	125	205	Alto volume de tráfego (interestaduais, muito pesado)

Após a moldagem dos CPS devem ser determinados os seguintes parâmetros: **massa específica aparente estimada (Gmb)**, **massa específica aparente corrigida** e **massa específica relativa teórica máxima (%G<sub>mm</sub>)** para cada N° de giros desejado.

Durante a compactação a altura deve ser medida após cada giro e registrada para o n° de giros mostrado na 1ª coluna

**Exemplo:** CP N° 1: Massa Total =

Gmm (medido) =

N° de Giros	Altura, mm	Gmb (estimado)	Gmb (corrigido)	% Gmm
(Nini)				
(Nproj)				
(Nmáx)				
Gmb (medido)	-		-	-

Os valores **Gmb (estimado)** foram determinados por:

$$V_{mx} = \frac{\pi d^2 h_x}{4} \times 0,001 \text{ cm}^3 / \text{mm}^3$$

Onde:

Vmx = volume do CP no molde durante a compactação (cm³)

d = diâmetro do molde (150 mm)

h<sub>x</sub> = altura do CP no molde durante a compactação

$$G_{mb}(\text{estimado}) = \frac{M_m / V_{mx}}{1000 \text{ g} / \text{cm}^3}$$

Onde:

Gmb (estimado) = massa específica aparente estimada do CP no molde durante a compactação

Mm = massa do CP (g)

Este cálculo de Gmb admite que o CP é um cilindro de laterais sem rugosidade, o que não é verdade. O volume do CP é levemente menor que o volume do cilindro de laterais sem rugosidade devido a irregularidades superficiais. É por isso que Gmb final estimado a N giros é diferente do Gmb medido após N giros.

Para corrigir esta diferença o Gmb estimado a qualquer nº de giros é corrigido pela razão da massa específica aparente medida pela massa específica aparente estimada a Nmáx usando a fórmula seguinte:

$$C = \frac{G_{mb}(\text{medido})}{G_{mb}(\text{estimado})}$$

Onde:

C = fator de correção

Gmb (medida) = massa específica aparente medida a Nmáx

Gmb (estimada) = massa específica aparente estimada a Nmáx

A Gmb estimada a todos outros a nº de giros pode ser corrigida usando **fator de correção** da seguinte fórmula:

$$G_{mb}(\text{corrigido}) = C \times G_{mb}(\text{estimado})$$

Onde:

Gmb (corrigida) = massa específica aparente corrigida do CP a qualquer giro N

C = fator de correção

Gmb (estimada) = massa específica aparente estimada a qualquer giro N

O %Gmm é calculado como a razão Gmb (corrigida) para Gmm (medida). Se este exemplo for feito com o propósito de formular um traço de mistura asfáltica, o percentual médio dos valores Gmm resultantes de 2 CPs devem ser usados para análises posteriores.

Parâmetros de projeto são estabelecidos com base no teor de vazios no **N<sub>inicial</sub>**, **N<sub>projeto</sub>** e **N<sub>máximo</sub>**.

A tabela a seguir apresenta o critério e os valores médios observados considerando média de dois corpos de prova do exemplo.

Nº de Giros	Critério de %Gmm	%Gmm Observado
Nini	< 89,0	
Nproj	96,0	
Nmáx	< 98,0	

Todo esse procedimento é repetido para as outras 2 misturas-tentativa, cujas médias de suas respectivas %Gmm são determinadas para Nini (9), Nprojeto (125), Nmáximo (205).

Mistura Tentativa	% Gmm a Nini	% Gmm a Nprojeto	% Gmm a Nmáximo
1			
2			
3			

A porcentagem de vazios (Vv) e vazios no agregado mineral (VAM) são determinados no Nprojeto

Calcula-se Vv da seguinte forma:

Mistura 1: % Vazios = 100 -

Mistura 2: % Vazios = 100 -

Mistura 3: % Vazios = 100 -

A porcentagem de vazios no agregado mineral (VAM) é calculada como segue:

$$\%VAM = 100 - \left( \frac{\%G_{mm} @ N_{proj} \times G_{mm} \times P_{ag}}{G_{sb}} \right)$$

Resumo da compactação das misturas-tentativa

Mistura Tentativa	% Ligante	% Gmm a Nini	% Gmm a Nproj	% Gmm a N <sub>máx</sub>	% Vazios	% VAM
1						
2						
3						

A premissa principal do projeto de mistura Superpave Nível 1 é que a quantidade correta de ligante asfáltico seja usada em cada mistura-tentativa de maneira que cada uma atinja exatamente 96% de Gmm ou 4% de vazios no  $N_{projeto}$ .

Uma pergunta: “Quando a % de vazios não atingir 4%, ou seja fica menor, se usar menos asfalto na mistura para obter 4% de vazios no  $N_{projeto}$ , será que o VAM e as outras propriedades requeridas podem melhorar a níveis aceitáveis?”

Fornecer uma resposta a essa questão é um passo importante no projeto de mistura Nível 1. Para responder, uma estimativa de teor de ligante para se obter 4% de vazios (96% de Gmm no  $N_{projeto}$ ) é determinada para cada mistura-tentativa usando a seguinte fórmula empírica:

$$Pl_{estimado} = Pl - [0,4 \times (4 - V_v)]$$

Onde:

Pl, estimado = porcentagem de ligante estimado

Pl = porcentagem de ligante inicial (tentativa)

V<sub>v</sub> = vazios no  $N_{projeto}$

As propriedades volumétricas (VAM e RBV) e de compactação da mistura são então **estimadas** para estes teores de ligantes usando as equações a seguir.

Etapas exclusivamente realizadas para responder: “O quê aconteceria às propriedades da mistura se eu tivesse usado a quantidade exata de asfalto para obter 4% de vazios no  $N_{projeto}$ ?”

É através desta etapa que se pode realizar uma comparação apropriada das misturas-tentativa.

Para VAM:

$$\%VAM_{estimado} = \%VAM_{inicial} + C \times (4 - V_v)$$

Onde:

$\%VAM_{inicial}$  = %VAM do teor de ligante tentativa

C = constante = 0,1 se  $V_v < 4,0\%$

= 0,2 se  $V_v > 4,0\%$

Para RBV:

$$\%RBV_{estimado} = 100\% \times \frac{(\%VAM_{estimado} - 4,0)}{\%VAM_{estimado}}$$

Para %Gmm no  $N_{inicial}$ :

$$\%Gmm_{estimado@Ni} = \%Gmm_{tentativa@Ni} - (4,0 - V_a)$$

Para %Gmm no  $N_{máximo}$ :

$$\%Gmm_{estimado@Nmáx} = \%Gmm_{tentativa@Nmáx} - (4,0 - V_a)$$

A tabela a seguir apresenta as propriedades volumétricas e de compactação das misturas-tentativa para o teor de ligante asfáltico que resulta em 4% de vazios no  $N_{projeto}$ .

**Propriedades volumétricas estimadas para  $N_{projeto}$**

Mistura Tentativa	% CAP Tentativa	% CAP Estimado	% Vazios	% VAM	% RBV	% Gmm a $N_{inicial}$	% Gmm a $N_{máximo}$
1							
2							
3							

As propriedades estimadas são comparadas com os critérios de projeto. Os critérios volumétricos e de compactação devem atender o tráfego de projeto e o tamanho máximo nominal dos agregados.

- Por fim, há uma faixa requerida para o fíler.
- Este critério é constante para todos os níveis de tráfego.
- Ele é calculado como uma % em massa do material passante na peneira n°200 (0,075 mm) dividido pelo teor de ligante efetivo (este em % da massa da mistura).
- O teor de ligante efetivo é calculado como segue:

$$P_{le, estimado} = -(P_{ag} \times G_l) \times \left( \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} \times G_{sb}} \right) + P_{l, estimado}$$

Cálculo da proporção de fíler:

$$PF = \frac{\%_{passante\#200}}{P_{le, estimado}}$$

#### Proporção de fíler nas misturas-tentativa

Mistura	Teor de Fíler	Critério
Tentativa 1		0,6 – 1,2
Tentativa 2		
Tentativa 3		

Após estimar todas as propriedades das 3 misturas, o projetista pode observar os valores e decidir se uma ou mais são aceitáveis ou se misturas-tentativa adicionais devem ser avaliadas

A partir destes dados, uma mistura é selecionada como sendo o projeto estrutural do agregado.

Um mínimo de 2 CPs são compactados a cada um dos seguintes teores de asfalto:

- teor de ligante estimado – 0,5%
- teor de ligante estimado
- teor de ligante estimado + 0,5%
- teor de ligante estimado + 1,0%

Uma vez selecionada a estrutura do agregado de uma das misturas-tentativa, novos CPs devem ser compactados variando o teor de ligante asfáltico. As propriedades da mistura serão então avaliadas para que se determine o teor de asfalto final de projeto.

Quatro teores são o mínimo requerido para a análise Superpave Nível 1. Um mínimo de 2 amostras também são preparadas para a determinação da massa específica máxima teórica no teor de ligante estimado. Os CPs são preparados e testados da mesma maneira que os CPs da etapa de Seleção do Projeto de Estrutura do Agregado.

As propriedades volumétricas são calculadas no número de giros de projeto ( $N_{\text{projeto}}$ ) para cada teor de ligante asfáltico testado. A partir destes dados pontuais o projetista pode gerar gráficos do teor de vazios, VAM e RBV versus teor de ligante asfáltico.

O teor de ligante asfáltico de projeto é estabelecido para um teor de vazios de 4% a  $N_{\text{projeto}}$ . Todas as outras propriedades são verificadas no teor de projeto quanto ao atendimento dos critérios.

Propriedades da Mistura	Resultado	Critério
% Vazios		
% VAM		
% RBV		
Teor de Fíler		0,6 – 1,2
% Gmm a $N_{\text{inicial}} =$		< 89 %
% Gmm a $N_{\text{máximo}} =$		< 98 %

## **Anexo 5: Slides**

### **SLIDES DE TODAS AS AULAS**