

Universidade Federal de Juiz de Fora  
Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído

Larissa de Oliveira Mendes

**UTILIZAÇÃO DO MÉTODO BAILEY PARA A SELEÇÃO DE AGREGADOS EM  
DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS**

Juiz de Fora

2011

Larissa de Oliveira Mendes

**Utilização do Método Bailey para a Seleção de Agregados em Dosagem de  
Misturas Asfálticas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Geraldo Luciano de Oliveira Marques, D.Sc.

**JUIZ DE FORA**

**2011**

Mendes, Larissa de Oliveira.

A utilização do método Bailey para a seleção de agregados em misturas asfálticas / Larissa de Oliveira Mendes. – 2011.

130 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído)–Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

1. Pavimentação asfáltica. I. Título.

CDU 625.8-032.37

**LARISSA DE OLIVEIRA MENDES**

**UTILIZAÇÃO DO MÉTODO BAILEY PARA A SELEÇÃO DE AGREGADOS EM  
DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre.

Aprovada em 16 de dezembro de 2011.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Geraldo Luciano de Oliveira Marques (Orientador)  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Roberta Cavalcanti Pereira Nunes (Co-orientadora)  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Prof. Dr. Carlos Alexandre Braz de Carvalho  
Universidade Federal de Viçosa

Ao meu avô, Sérgio, pelo exemplo de luta e vitória.

Aos meus pais e irmão, pelo amor incondicional.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por não ter me abandonado nesses dois anos de luta, mesmo quando as adversidades surgiram e por me fazer acreditar que dias melhores sempre virão.

Ao meu avô, Sérgio, por ter sido um grande exemplo de vida, exemplo este que perdurará pela eternidade. Agradeço a Deus pela oportunidade de ter tido o senhor como avô... Te amo para todo o sempre.

Aos meus pais, por terem me apoiado em todas as decisões tomadas, mesmo que não soubessem o que estaria por vir. E ao meu irmão e cunhada, pelo carinho e pela acolhida sempre que precisei. Amo vocês!

Ao Geraldo, que foi muito mais que um orientador, foi um amigo. Ensinou-me muito mais que pedi, me fazendo ver as coisas e tentando buscar as soluções. Fez-se presente mesmo em pequenos gestos, soube compreender as minhas dificuldades ao longo desse ano complicado e, acima de tudo, por ser um grande exemplo de profissional. Levarei todos os ensinamentos guardados comigo!

Aos laboratoristas Hélio, Jorge e Romário, que além de ensaios, me auxiliaram a superar os dias difíceis através do bom humor dentro do Laboratório de Pavimentação. Obrigada por tudo que fizeram!

Ao Nilton Júnior, por todo amor e paciência, sabendo compreender minhas ausências e me incentivando sempre, mesmo quando nem eu acreditava.

Aos professores Carlos Alexandre e Roberta, por aceitarem participar da minha banca.

À UFJF e à Capes, pelo apoio financeiro.

“Concedei-me, Senhor a serenidade necessária para aceitar as coisas que não posso modificar; coragem para modificar aquelas que posso e sabedoria para distinguir uma das outras.”

## RESUMO

As misturas asfálticas, atualmente, são dosadas por tentativas a partir de uma faixa granulométrica de referência, se tornando para projetistas menos experientes, um método difícil e de “tentativas e erros”, onde as características desejadas não são garantidas e nem o aproveitamento da contribuição do esqueleto mineral sobre as características mecânicas das misturas asfálticas. Um método de dosagem de misturas asfálticas que se baseia na distribuição granulométrica dos agregados e que considere a importância dos mesmos para o desempenho e a durabilidade é essencial para garantir pavimentos de qualidade. O método de Bailey surgiu na década de 1980 e se baseia numa seleção e avaliação granulométrica, considerando o intertravamento dos agregados graúdos, gerando um forte esqueleto mineral da mistura de agregados, fundamental para o bom desempenho das misturas asfálticas. O objetivo desse trabalho é comparar o desempenho de misturas asfálticas dosadas por uma metodologia tradicional ao desempenho obtido com a utilização do Método de Bailey para proporcionamento dos agregados, comprovando seus benefícios. A fim de avaliar o desempenho de misturas dosadas por diferentes critérios de escolha de agregados (tradicional e Bailey), foi elaborado um planejamento experimental, onde se comparou o desempenho das misturas através de ensaios mecânicos: resistência à fadiga, deformação permanente, módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral. Consideram-se, ainda, os parâmetros obtidos das curvas de compactação giratória dos corpos de prova. Os resultados obtidos indicam a boa adequação do método Bailey na consideração do intertravamento das partículas para a obtenção de curvas granulométricas adequadas o que refletiu em melhoria de desempenho nas misturas estudadas principalmente na deformação permanente e na resistência a tração por compressão diametral.

Palavras-Chave: Método Bailey, Misturas Asfálticas, Seleção Granulométrica.

## **ABSTRACT**

The asphalt mixtures, currently, are measured by attempts from a particle size range of reference, making for less experienced designers, and a difficult method of "trial and error", where the desired characteristics are not guaranteed, and neither the use of the contribution the mineral skeleton on the mechanical characteristics of asphalt mixtures. A determination method of asphalt mixtures based on the size distribution of aggregates and to consider their importance for performance and durability is essential to ensure high quality pavement. The method of Bailey emerged in the 1980's and based on a particle size selection and evaluation, considering the coarse aggregate interlock, creating a strong mineral skeleton of the mixture of aggregates, which is essential for the proper performance of asphalt mixtures. The aim of this study is to compare the performance of asphalt mixtures assayed by a traditional approach to the performance obtained using the Bailey method for proportioning the aggregates, proving its benefits. In order to evaluate the performance of mixtures assayed by different criteria for choosing aggregates (traditional and Bailey), an experimental design was developed, which compared the performance of mixtures by mechanical tests: fatigue strength, permanent deformation, modulus of resilience and tensile strength by diametrical compression. Are considered, although the parameters obtained from the gyratory compressor curves of the specimens. The results obtained indicate the good suitability of the method Bailey in consideration of interlocking of particles to obtain suitable curves for a fact reflected in improved performance in the mixtures studied mainly in permanent deformation and tensile strength by diametrical compression.

**Keywords:** Bailey Method, Asphalt Mixtures, Granulometric Selection

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção Transversal Típica de um Pavimento Asfáltica (BERNUCCI et. al, 2007) .	16
Figura 2 – Condição da Superfície do Pavimento (Adaptado de: CNT, 2010) .....	19
Figura 3 – Características dos agregados.....	22
Figura 4 - Representação da curva granulométrica em carta de potência de 0,45 (MARQUES, 2001) .....	25
Figura 5 - Massa específica solta do agregado graúdo (VAVRIK et al., 2002). .....	29
Figura 6 - Massa específica compactada do agregado graúdo (VAVRIK et al., 2002). .....	31
Figura 7 - Seleção da Massa Específica dos Agregados Graúdos (VAVRIK et al., 2002). ...	33
Figura 8 - Massa Específica Compactada do Agregado Miúdo (VAVRIK et al., 2002). .....	34
Figura 9 - Visão geral das divisões em uma graduação contínua, que permite analisar a graduação (VAVRIK et al., 2002).....	37
Figura 10 - Fluxograma para a obtenção do teor de projeto pelo método SUPERPAVE (Adaptado de: BERNUCCI et. al, 2007) .....	45
Figura 11 - Esquema do compactador giratório SUPERPAVE (MOTTA et al., 1996).....	46
Figura 12 – Compactador Giratório do Laboratório de Pavimentação da UFJF, composto por um sistema de aquisição de dados e o compactador de misturas (Fonte: o autor) .....	46
Figura 13 – Configurações do SGC e parâmetros de compactação (MOTTA et al., 1996) ..	47
Figura 14 – Curva de Densificação obtida com o compactador giratório para o corpo de prova número 82 (Fonte: o autor) .....	48
Figura 15 – Representação gráfica do CDI (NASCIMENTO, 2008) .....	51
Figura 16 – Representação gráfica do TDI (NASCIMENTO, 2008).....	52
Figura 17 – Montagem do suporte do LVDT (GENELHU, 2009).....	55
Figura 18 – Esquema de montagem do ensaio de Módulo de Resiliência (GENELHU, 2009) .....	56
Figura 19 – Tela para a entrada de dados para a realização do ensaio de Módulo de Resiliência (Fonte: o autor) .....	57
Figura 20 – Tela com o andamento do ensaio de Módulo de Resiliência (Fonte: o autor) ...	57
Figura 21 – Relatório obtido com o ensaio de Módulo de Resiliência (Fonte: o autor) .....	58
Figura 22 – Montagem das alças dos LVDTs (GENELHU, 2009) .....	59
Figura 23 – Esquema de montagem do ensaio creep estático (GENELHU, 2009).....	60
Figura 24 – Tela de entrada de dados para a realização do ensaio de creep estático .....	60
Figura 25 – Tela com o andamento do ensaio de creep estático .....	61
Figura 26 – Relatório obtido com o ensaio de Creep Estático (Fonte: o autor) .....	62

Figura 27 – Montagem do ensaio de fadiga .....	63
Figura 28 – Tela de entrada de dados para a realização do ensaio de Vida de Fadiga .....	64
Figura 29 – Tela com o andamento do ensaio de Vida de Fadiga .....	65
Figura 30 – Relatório obtido com o ensaio de Vida de Fadiga – Dados de todos os corpos de prova (Fonte: o autor) .....	66
Figura 31 – Relatório obtido com o ensaio de Vida de Fadiga – Curvas obtidas (Fonte: o autor) .....	67
Figura 32 – Visão geral da Pedreira Pedra Sul. (PEDRA SUL, 2011) .....	70
Figura 33 – Pilhas de materiais.....	71
Figura 34 – Britadores de Mandíbula .....	71
Figura 35 – Amostragem dos materiais em diferentes pilhas .....	71
Figura 36 – Quarteamento de amostras de agregados para a realização de ensaios .....	72
Figura 37 – Composição Granulométrica dos Agregados .....	73
Figura 38 – Representação da curva granulométrica da mistura tradicional em escala semilogarítmica.....	78
Figura 39 – Representação da curva granulométrica da mistura tradicional em forma de carta na potência de 0,45 .....	78
Figura 40 – Representação da curva granulométrica da mistura Bailey em escala semilogarítmica.....	80
Figura 41 – Representação da curva granulométrica da mistura Bailey em forma de carta na potência de 0,45 .....	81
Figura 42 – Representação da curva granulométrica da mistura Bailey MEE + 5% em escala semilogarítmica.....	83
Figura 43 – Representação da curva granulométrica da mistura Bailey MEE + 5% em forma de carta na potência de 0,45.....	83
Figura 44 – Representação da curva granulométrica da mistura Bailey AG + 0,2 em escala semilogarítmica.....	85
Figura 45 – Representação da curva granulométrica da mistura Bailey AG + 0,2 em forma de carta na potência de 0,45 .....	86
Figura 46 – Representação das curvas granulométricas das misturas estudadas em escala semilogarítmica.....	87
Figura 47 – Equipamento utilizado para a determinação da DMM .....	92
Figura 48 – Resistência à Tração (MPa) para as misturas estudadas .....	97
Figura 49 – Módulo de Resiliência (MPa) para as misturas estudadas .....	98
Figura 50 – Relação MR/RT para as misturas estudadas .....	99

Figura 51 – Número de Repetições (N) x Diferença de Tensões ( $\Delta\sigma$ ) para as misturas estudadas.....	101
Figura 52 – Número de Repetições (N) x Deformação Específica para as misturas estudadas .....	102
Figura 53 – Deformação Permanente das misturas estudadas.....	103
Figura 54 – Valores obtidos para os parâmetros obtidos com as curvas de compactação.	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas recomendadas para as proporções de agregados em misturas (VAVRIK et al., 2002).....	37
Tabela 2 – Peneiras de controle para diferentes Tamanhos Nominais de Mistura (TMN) (VAVRIK et al., 2002).....	38
Tabela 3 – Parâmetros de Compactação – determinação do Nprojeto, adaptado de Bernucci et al (2007) .....	44
Tabela 4 – Tabela com os dados obtidos pelo compactador giratório (Fonte: o autor).....	49
Tabela 5 – Análise Granulométrica dos Agregados .....	73
Tabela 6 – Caracterização dos Agregados .....	74
Tabela 7 – Caracterização do Ligante Asfáltico .....	75
Tabela 8 – Composição de agregados da Mistura Tradicional.....	77
Tabela 9 – Composição granulométrica da Mistura Tradicional .....	77
Tabela 10 – Composição de agregados da Mistura Bailey .....	79
Tabela 11 – Composição granulométrica da Mistura Bailey.....	80
Tabela 12 – Composição de agregados da Mistura Bailey MEE + 5%.....	82
Tabela 13 – Composição granulométrica da Mistura Bailey MEE + 5% .....	82
Tabela 14 – Composição de agregados da Mistura Bailey AG + 0,2 .....	84
Tabela 15 – Composição granulométrica da Mistura Bailey AG + 0,2.....	85
Tabela 16 – Composição de agregados da misturas estudadas .....	86
Tabela 17 – Composição granulométrica das misturas estudadas.....	87
Tabela 18 – Parâmetros granulométricos das misturas utilizadas.....	88
Tabela 19 – Teor de projeto das misturas estudadas.....	90
Tabela 20 – Parâmetros Volumétricos das misturas estudadas.....	96
Tabela 21 – Resultados da Resistência à Tração (MPa) para as misturas estudadas .....	97
Tabela 22 – Resultados da Módulo de Resiliência (MPa) para as misturas estudadas .....	98
Tabela 23 – Relação MR/RT para as misturas estudadas .....	99
Tabela 24 – Parâmetros CDI e TDI.....	104

## LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

$\%G_{mm}$	Porcentagem da Densidade Máxima
AASHTO	“American Association of State Highway and Transportation Officials”
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Agregado Graúdo
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ASTM	“American Society for Testing and Materials”
CBR	Índice de Suporte Califórnia
CDI	“Compaction Densification Index”
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CNT de Rodovias	Confederação Nacional do Transporte de Rodovias
CP	Corpo de Prova
D	Diâmetro
D(t)	Função Fluência
Dap	Densidade Aparente
$d_b$	Densidade Específica do Asfalto
DMM	Densidade Máxima Medida
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
E	Módulo de Elasticidade
ES	Especificação de Serviço (DNIT/DNER)
EVA	Etileno Acetato de Vinila
f	Índice de Forma
FAF	Fração Fina dos Agregados finos
FHWA	“Federal Highway Administration”
GAF	Fração Graúda dos Agregados Finos
$G_{mm}$	Densidade Máxima
GTM	“Giratory Test Machine”
H	Altura
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo

IDOT	“Illinois Department of Transportation”
LCPC	“Laboratoire Central des Ponts et Chaussées”
LVDT	“Linear Variable Differential Transformer”
ME	Método de Ensaio (DNIT/DNER)
MEE	Massa Específica Escolhida
Mi	Massa Imersa
MR	Módulo de Resiliência
Ms	Massa Seca
Mu	Massa Úmida
N <sub>proj</sub>	Número de Giros de Projeto
PCP	Peneira de Controle Primário
PCS	Peneira de Controle Secundário
PCT	Peneira de Controle Terciário
PGC	Prensa de Cisalhamento Giratório
PM	Peneira Média
RBV	Relação Betume Vazios
RPM	Rotações por Minuto
SENAT	Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte
SEST	Serviço Social do Transporte
SGC	Compactador Giratório SUPERPAVE
SHRP	“Strategic Highway Research Program”
SiCAEP	Sistema de Controle e Aquisição de Dados
SMA	“Stone Matrix Asphalt”
t	Teor de Asfalto
TDI	“Traffic Densification Index”
TMN	Tamanho Máximo Nominal
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
VAM	Vazios no Agregado Mineral
V <sub>v</sub>	Volume de Vazios
ε	Deformação Recuperável
σ	Tensão

## SUMÁRIO

1 Introdução.....	16
1.1 Considerações iniciais .....	16
1.2 Justificativa .....	18
1.3 Objetivo .....	20
2 Revisão De Literatura .....	21
2.1 Caracterização de Agregados .....	21
2.2 Método Bailey .....	26
2.2.1 Considerações Iniciais.....	26
2.2.2 Arranjo de Agregados.....	27
2.2.3 Agregado Graúdo e Miúdo .....	28
2.2.4 Combinação de agregados por Volume .....	28
2.2.5 Massa Específica Solta do Agregado Graúdo .....	29
2.2.6 Massa Específica Compactada do Agregado Graúdo.....	30
2.2.7 Massa Específica Escolhida de Agregado Graúdo .....	32
2.2.8 Massa Específica Compactada do Agregado Miúdo .....	34
2.2.9 Determinação da granulometria utilizada .....	35
2.2.10 Análise das misturas de projeto .....	36
2.2.10 Considerações Finais Sobre o Método Bailey .....	40
2.3 COMPACTAÇÃO GIRATÓRIA .....	41
2.3.1 Histórico .....	41
2.3.2 SUPERPAVE .....	43
2.3.3 Compactador giratório SUPERPAVE .....	45
2.3.4 Parâmetros obtidos do Compactador Giratório .....	50
2.3.4 Considerações Finais Sobre os Índices Obtidos com a Compactação Giratória .....	52

2.4 Ensaaios Mecânicos .....	53
2.4.1 Módulo de Resiliência .....	54
2.4.2 Creep Estático .....	59
2.4.3 Vida de Fadiga .....	62
2.4.4 Considerações Finais Sobre os Ensaaios Mecânicos .....	67
3 Materiais E Métodos .....	69
3.1 Agregados .....	70
3.2 Material Asfáltico .....	75
3.3 Mistura de Agregados .....	75
3.3.6 Parâmetros Granulométricos do Método Bailey .....	88
3.4 Preparação dos Corpos de Prova .....	88
3.4.1 Mistura de Agregados .....	89
3.4.2 Dosagem das Misturas .....	89
4 Resultados E Análises .....	95
4.1 Parâmetros Volumétricos .....	95
4.2 Parâmetros Mecânicos .....	96
5 Conclusões E Sugestões Para Trabalhos Futuros .....	108
5.1 Conclusões .....	108
5.2 Sugestões e Recomendações Para Trabalhos Futuros .....	109
Referências .....	111
Anexo A – Parâmetros Volumétricos das Misturas Estudadas .....	117
Anexo B – Resultados dos Ensaaios Mecânicos .....	122
Anexo C – Tabelas do Método Bailey .....	126

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O pavimento é uma estrutura construída sobre a superfície final de terraplanagem, sendo constituído por camadas de espessuras finitas, cuja finalidade é resistir aos esforços oriundos das solicitações do tráfego de veículos e do clima local. Além disso, o pavimento deve propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI et. al, 2007).

Os pavimentos rodoviários são usualmente de dois tipos básicos: rígidos e flexíveis, sendo que o segundo caso é o mais comumente utilizado em nosso país. A Figura 1 mostra um esquema básico de como os pavimentos são constituídos.

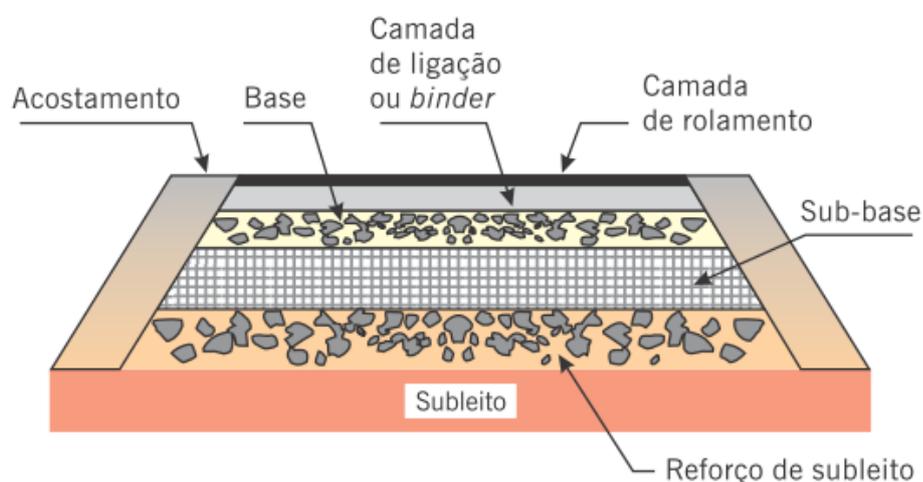


Figura 1 - Seção Transversal Típica de um Pavimento Asfáltico (BERNUCCI et. al, 2007)

A camada de rolamento, que é a camada pela qual os usuários dos veículos circulam, é responsável por resistir diretamente à ação do tráfego. Essa camada geralmente é composta por ligante asfáltico e agregados.

Constituindo cerca de 90% a 95% em peso e de 70% a 85% do volume das misturas asfálticas, os agregados são responsáveis por resistir à maior parte da carga imposta ao revestimento, sendo, então, fundamentais ao desempenho do pavimento (ASPHALT INSTITUTE, 1989).

A dosagem de misturas asfálticas para pavimentos flexíveis hoje se baseia principalmente em métodos volumétricos (Marshall, por exemplo), que consideram a

distribuição granulométrica dos agregados e sua influência nas misturas asfálticas de forma indireta (NASCIMENTO, 2008).

Atualmente as misturas asfálticas são dosadas por tentativas a partir de uma faixa granulométrica de referência. Para projetistas menos experientes, torna-se um método difícil e de “tentativas e erros”, onde não se garantem as características desejadas e nem se aproveita da contribuição do esqueleto mineral sobre as características mecânicas das misturas asfálticas.

Métodos que considerem a importância dos agregados no desempenho e durabilidade dos pavimentos são de suma importância para a obtenção de misturas asfálticas mais resistentes aos esforços a que são submetidas.

O desempenho dos revestimentos quando solicitados pelo tráfego ou pelas condições climáticas depende das propriedades e do proporcionamento de cada um dos seus materiais constituintes (NASCIMENTO, 2008).

Por resistirem à maior parte das cargas do tráfego, o agregado em um revestimento asfáltico pode ser considerado como o “esqueleto” da mistura. Suas propriedades de dureza, textura superficial, angularidade, forma e distribuição granulométrica são as que mais se relacionam a essa resistência.

O método de Bailey foi desenvolvido no departamento de transportes de Illinois (IDOT) e vem sendo utilizado desde a década de 1980 para proporcionar agregados em misturas asfálticas. Estudos buscam refinar o método para que ele se torne aplicável a qualquer mistura, independente do tamanho máximo do agregado (VAVRIK et al., 2002).

Esse método visava a princípio, suprir a necessidade dos órgãos americanos que projetam e executam pavimentos no que diz respeito à capacidade de proporcionar um revestimento com resistência às deformações permanentes, às trincas por fadiga e ao desgaste, através da seleção sistemática da granulometria de misturas asfálticas.

Com relação à pavimentação urbana, que é aquela que trata do entendimento, construção e manutenção dos pavimentos de vias urbanas, apesar de suas semelhanças ao pavimento rodoviário, esse pavimentos apresentam especificidades, diferenças e carências que nem sempre são consideradas por técnicos, normas e administradores (MARQUES, 2011).

Ainda segundo Marques (2011), muitas vezes a técnica rodoviária é transferida para a via urbana sem preocupações e considerações com relação, por exemplo, ao tráfego, velocidade, tipos de veículos e materiais.

O pavimento urbano deve, então, ser tratado como um tipo particular de pavimento e deve ser tratado de acordo com as características necessárias para o seu bom comportamento às solicitações a que está sujeito.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo dados da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2008), em 2007, o Brasil contava com cerca de 211.678 km de rodovias pavimentadas, que, em sua maioria, são revestidas com pavimentos flexíveis. Estes dados passaram a motivar os estudos visando a melhoria das vias do país.

Em 2010, realizou-se a 14<sup>a</sup> edição da Pesquisa CNT de Rodovias, organizada pela Confederação Nacional do Transporte (CNT), associada ao Serviço Social do Transporte (SEST) e ao Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte (SENAT), cujo objetivo era saber as reais condições das rodovias no país, segundo critérios perceptíveis pelos usuários.

Foram avaliados 90.945 km de vias, que correspondem à soma das extensões de toda a rede federal pavimentada e da malha constituída pelas principais rodovias estaduais. Segundo a Figura 2, 56,1% dos pavimentos analisados necessitam de algum tipo de intervenção, por apresentarem, em maior ou menor grau, defeitos no pavimento (CNT, 2010).

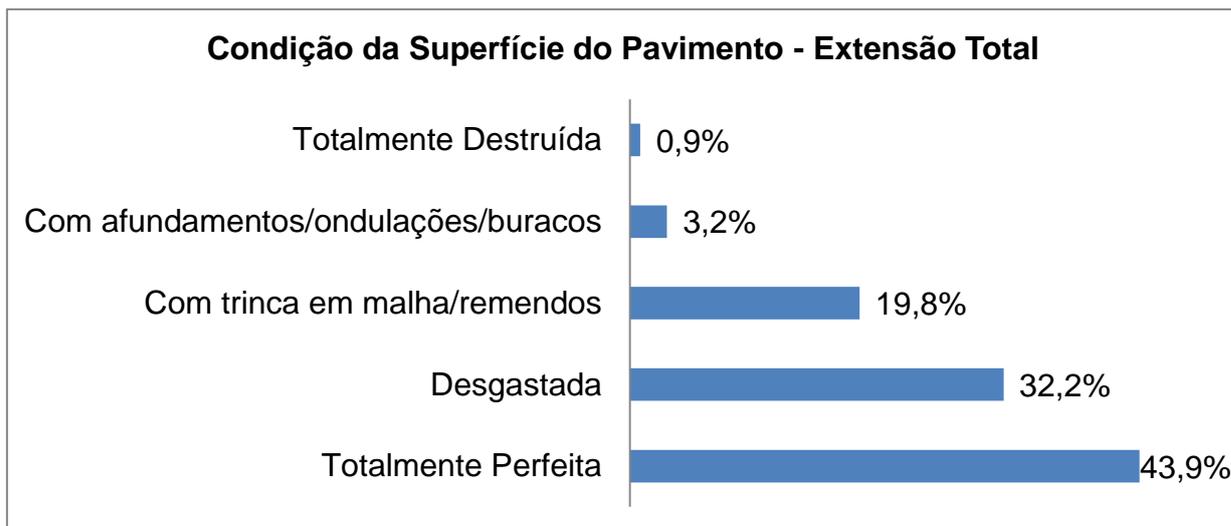


Figura 2– Condição da Superfície do Pavimento (Adaptado de: CNT, 2010)

Os pavimentos, tanto urbanos quanto rodoviários, devem ser capazes de resistir aos esforços a que são submetidos, sem que para isso se deformem causando desconforto a seus usuários, além de problemas com a segurança.

A utilização de agregados naturais (ou que venham de processamentos de materiais naturais, como as pedras britadas) está se tornando cada vez mais limitada e controlada. Para utilizações futuras é provável que o uso destes materiais naturais seja permitido apenas por meio de justificativas consistentes e sustentáveis. Como eles são essenciais nas misturas asfálticas, sua utilização deve ser justificada sob a ótica do bom desempenho e da garantia de melhores condições dos revestimentos executados.

Para que outros materiais alternativos empregados em misturas asfálticas, também possam ser analisados e estudados pelo Método Bailey, é necessário um estudo inicial e de referência utilizando agregados naturais, por isso, nessa pesquisa, serão utilizados materiais típicos da região de Juiz de Fora.

As misturas asfálticas além de utilizar materiais adequados, devem utilizar um método de seleção granulométrica que garanta uma forte estrutura de agregados e permita a utilização de um teor de ligante que seja suficiente para garantir uma boa durabilidade (CUNHA, 2004).

O método Bailey se baseia numa seleção e avaliação granulométrica, considerando o intertravamento dos agregados graúdos, gerando um forte esqueleto mineral da mistura de agregados, fundamental para o bom desempenho das misturas (VAVRIK, 2001).

Apesar das vantagens da utilização do Método Bailey, o Brasil ainda não conta com um número expressivo de estudos sobre a aplicabilidade do método a agregados e misturas asfálticas utilizados na composição de revestimentos asfálticos.

### 1.3 OBJETIVO

Os objetivos principais dessa pesquisa são:

- Analisar os efeitos da graduação dos agregados no desempenho de misturas asfálticas, especialmente no intertravamento dos agregados graúdos;
- Comparar os resultados obtidos em dosagens que utilizem o método de Bailey para o proporcionamento do esqueleto mineral à dosagem volumétrica tradicional, por meio de ensaios mecânicos, como módulo de resiliência, vida de fadiga e resistência à deformação permanente, além das análises de desempenho por meio da compactação giratória.

Além dos objetivos principais, apresenta-se neste trabalho a importância da escolha adequada do esqueleto mineral no processo de dosagem de misturas asfálticas.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Com a finalidade de embasar o estudo em questão, buscou-se na literatura nacional e internacional, fundamentação teórica sobre os principais assuntos abordados.

Para isso, foram abordados temas relevantes para a elaboração dessa pesquisa: a caracterização de agregados e sua importância em misturas asfálticas; o Método Bailey de seleção granulométrica dos agregados utilizados em pavimentação; a compactação giratória, que foi utilizada para a obtenção dos corpos de prova ensaiados e os ensaios mecânicos utilizados para a caracterização das misturas obtidas.

### 2.1 CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS

De acordo com a ABNT NBR 9935/2005, o agregado, de uma forma geral, “é o material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassa e concreto”.

Os agregados são classificados segundo a sua natureza, da seguinte forma: naturais, que são aqueles utilizados da forma que se encontram na natureza, passando somente por operações de britagem e lavagem, quando necessário; artificiais, que são resultantes de alterações físicas e químicas de outros materiais; e reciclados, que são aqueles reutilizados, oriundos de diversos materiais.

Em se tratando de agregados naturais, suas propriedades dependem diretamente das características de sua rocha de origem, sendo que o processo de produção nas pedreiras pode comprometer a qualidade dos agregados, por inclusão das camadas mais fracas da rocha e por efeito da britagem na forma de partícula e na graduação do agregado (MARQUES, 2001).

Com relação à sua aplicação nos pavimentos, os agregados são os principais responsáveis pela resistência às cargas impostas pelo tráfego e suas propriedades deveriam ser consideradas no momento da dosagem. As propriedades que determinam a adequação ao uso em misturas asfálticas são em maior extensão, as

propriedades físicas e em menor extensão as propriedades químicas (ROBERTS et al., 1996).

Para serem utilizados em misturas asfálticas, os agregados, assim como representado na Figura 3, devem apresentar algumas características como dureza, tenacidade, durabilidade, graduação adequada, apresentar partículas cúbicas com baixa porosidade, além de ser forte e apresentar superfície limpa, rugosa e hidrofóbica.

A avaliação da adequabilidade se dá através da análise de algumas características físicas: tenacidade; resistência abrasiva; durabilidade; sanidade; forma da partícula (lamelaridade e angulosidade); textura superficial, limpeza/materiais deletérios, afinidade ao asfalto, porosidade e absorção; características expansivas; polimento e características friccionais; tamanho e graduação e densidade específica/massa específica.

Neste estudo, enfatizaram-se as seguintes características: forma e textura superficial das partículas; e sua granulometria e tamanho.

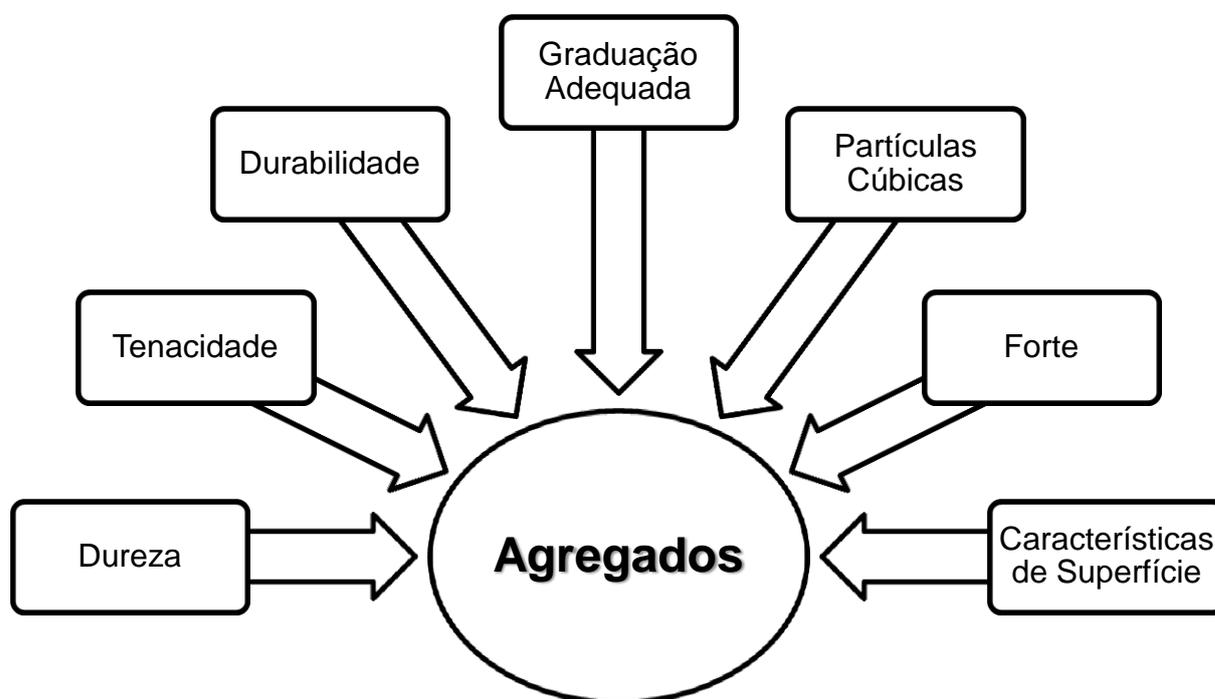


Figura 3– Características dos agregados

### 2.1.1 Forma e textura superficial das partículas

A forma das partículas influencia a trabalhabilidade e a resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas, além de interferir na energia de compactação necessária para se alcançar determinada densidade (BERNUCCI et al., 2007).

As partículas desejáveis para serem utilizadas em misturas asfálticas são aquelas que possuem forma cúbica. Para gerarem misturas com maior intertravamento e atrito interno em misturas compactadas que resultem em maior estabilidade mecânica, as partículas devem possuir forma angular. Porém, para misturas com maior trabalhabilidade e menor esforço de compactação, são necessárias partículas arredondadas. No entanto essa facilidade de compactação pode não ser positiva ao longo do tempo, uma vez que elas podem continuar a se densificar sob ação do tráfego, levando a deformações permanentes no pavimento (MARQUES, 2001).

Após a compactação, as partículas planas e alongadas tendem a apoiar suas faces planas na mistura, resultando em misturas com menores vazios do agregado mineral (VAM). Como possuem tendência a quebrar durante a compactação, as misturas resultantes podem ser diferentes das projetadas. Uma vez que a superfície específica dessas partículas são maiores que as de forma cúbica, o consumo de asfalto também é maior e as misturas fabricadas com eles podem ter dificuldade de compactação e trabalhabilidade (GOUVEIA, 2002).

Para a determinação da forma das partículas, no Brasil, utiliza-se o método de ensaio descrito em DNER–ME 086/94: Agregado – determinação do índice de forma. O índice de forma (f) caracteriza o agregado e varia entre  $f = 0,0$ , quando o agregado é considerado lamelar; e  $f = 1,0$ , quando ele é considerado de ótima cubicidade. Segundo a norma do DNIT-ES 031/2006: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico, para ser utilizado em misturas asfáltica, adota-se o limite mínimo de 0,5 para aceitação de agregados quanto à forma.

Assim como a forma, a textura superficial influi na trabalhabilidade das misturas. Essa propriedade também influi na adesividade, e na resistência ao atrito e ao cisalhamento das misturas asfálticas (BERNUCCI et al., 2007).

Agregados com textura superficial rugosa, como encontrada em rochas britadas, tendem a aumentar a resistência das misturas, mas reduzem a

trabalhabilidade quando comparadas com misturas produzidas com agregados de superfície lisa, como cascalhos e areia de rios, e necessitam de uma quantidade maior de cimento asfáltico. Esses agregados também geram mais vazios na massa compactada, produzindo espaço adicional para o cimento asfáltico. Apesar de agregados de textura lisa serem facilmente recobertos pelo filme asfáltico, as ligações mecânicas são usualmente mais fortes com os agregados de textura rugosa (ROBERTS et al., 1996).

A textura superficial dos agregados será determinada pelo procedimento constante na norma da ASTM D 3398 (2006), que determina o índice de forma e a textura das partículas de agregados.

### 2.1.2 Granulometria

A granulometria ou graduação dos agregados é a distribuição do tamanho das partículas, geralmente expressa em porcentagem do peso ou do volume total da mistura, sendo que a primeira forma é mais utilizada. Apesar de sua importância, a distribuição por volume é menos utilizada pela menor facilidade. Quando as densidades dos vários agregados utilizados são aproximadamente iguais, pode-se assumir essa simplificação. Quando as diferenças entre as densidades forem grandes, é necessário utilizar a determinação por porcentagem do volume total da mistura (GOUVEIA, 2002).

A obtenção da granulometria se dá através do peneiramento do material por uma série de peneiras empilhadas com aberturas progressivamente menores, pesando-se o material retido em cada uma delas. Sua representação pode ser feita de forma gráfica, traçando-se uma curva granulométrica, onde a ordenada corresponde à porcentagem total de peso passante em um dado tamanho sobre uma escala aritmética, e a abscissa representa o tamanho da partícula, plotada em escala logarítmica.

A graduação afeta quase todas as propriedades importantes de uma mistura incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga, resistência por atrito e resistência ao dano por umidade; sendo, por isso, a primeira consideração num projeto de mistura asfáltica (MARQUES, 2001).

No início dos anos de 1960, a FHWA (Federal Highway Administration) introduziu um gráfico de graduação de agregados baseado na Curva de Fuller, que propõe a graduação ideal através da densidade máxima. De acordo com a proposta deste gráfico, mais conhecido como carta de potência de 0,45, a determinação da linha de densidade máxima e o ajuste da graduação do agregado se dão de forma simples. De acordo com a FHWA esse gráfico deveria ser utilizado no processo de dosagem das misturas asfálticas (MARQUES, 2001).

Na Figura 4, pode-se observar a aplicação do gráfico na potência de 0,45.

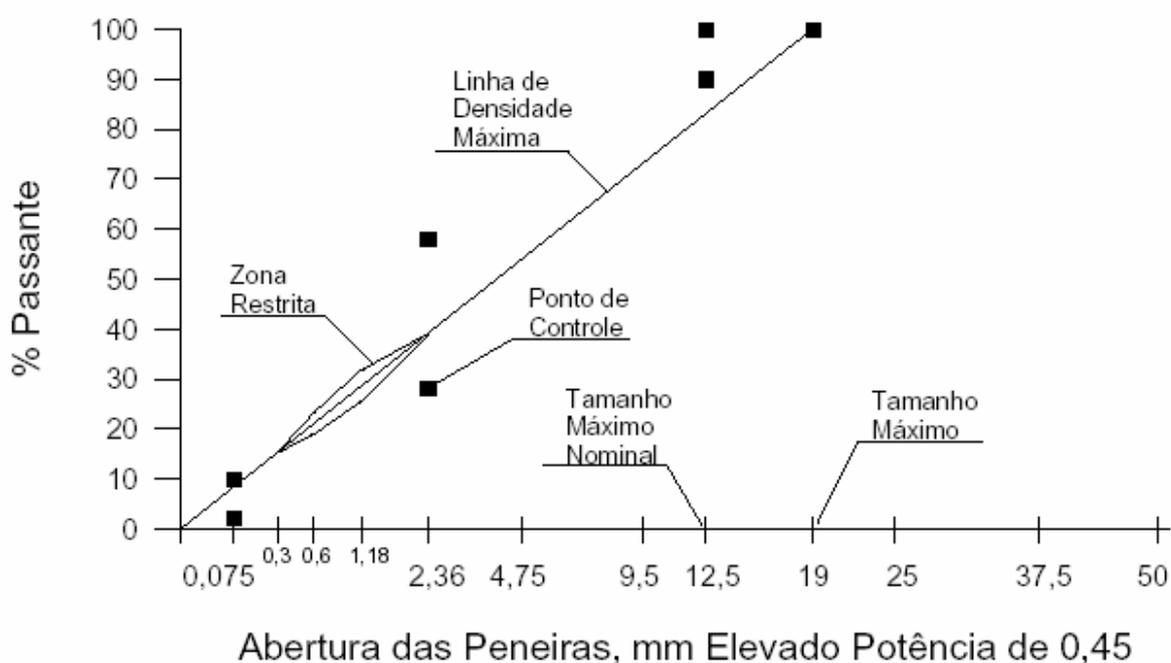


Figura 4 - Representação da curva granulométrica em carta de potência de 0,45 (MARQUES, 2001)

### 2.1.3 Tamanho do agregado

Para assegurar um bom desempenho, é importante considerar o tamanho máximo da partícula de agregado: se o tamanho máximo é muito pequeno, a mistura pode ser instável; quando é muito grande, podem aparecer problemas de trabalhabilidade e de segregação da mistura (GOUVEIA, 2002).

Segundo Motta et al (1996), as especificações americanas indicam o tamanho máximo de partículas de cada agregado usado e usam duas designações de tamanho máximo de partícula:

- Tamanho nominal máximo: tamanho de peneira maior do que a primeira peneira que retém mais de 10% de uma série padronizada de peneiras.

- Tamanho máximo: tamanho de peneira maior que o tamanho nominal máximo de partículas. Será a menor peneira através da qual passa 100 % de partículas do agregado.

## 2.2 MÉTODO BAILEY

### 2.2.1 Considerações Iniciais

O Método Bailey de seleção de agregados para uso em pavimentos asfálticos foi desenvolvido inicialmente pelo engenheiro Robert Bailey, do Departamento de Transporte de Illinois (IDOT), sendo usado e aprimorado desde a década de 1980.

O agregado em um concreto asfáltico cumpre o papel de esqueleto da mistura, porque é capaz de resistir à maior parte das cargas impostas pelo tráfego. As características que lhe conferem essa resistência são a dureza, a textura superficial, a angularidade, a forma e sua distribuição granulométrica.

Esse método tem por objetivo combinar os agregados, possibilitando, quando desejado, seu intertravamento e transformando-os no esqueleto da estrutura, além de utilizar uma graduação contínua e balanceada, completando a mistura (VAVRIK et al., 2002).

Apesar de poder ser utilizado com qualquer método de projeto de misturas (SUPERPAVE e Marshall, por exemplo), o método Bailey tem sido refinado com o objetivo de ser aplicável a misturas densas independente do tamanho máximo do agregado.

As misturas resultantes de um processo de seleção granulométrica, como no Método Bailey, segundo Vavrik et. al (2002) e Cunha et. al (2004), tendem a ser mais estáveis e possuem um volume de vazios no agregado mineral (VAM) compatível com uma boa durabilidade.

Os dois princípios básicos utilizados pelo método de Bailey são o arranjo de agregados e a definição de agregados graúdos e miúdos, que se diferencia das definições utilizadas normalmente.

Inicialmente, seleciona-se o grau de intertravamento dos agregados, que torna a mistura capaz de resistir à deformação permanente. Para garantir que a

quantidade de ligante asfáltico seja suficiente, modifica-se a quantidade de agregados graúdos e miúdos, alterando os Vazios no Agregado Mineral (VAM).

Para iniciar a aplicação do método, combinam-se os agregados em volume e a mistura resultante é analisada.

### 2.2.2 Arranjo de Agregados

O preenchimento de vazios numa mistura de agregados nunca será total, dependendo de alguns fatores (VAVRIK et al., 2001):

- Tipo e quantidade de energia de compactação: as energias de compactação diferenciam-se umas das outras e podem levar a uma maior ou menor compactação das misturas, assim como a quantidade de energia imposta ao sistema pode fazê-lo.
- Forma dos agregados: assim como abordado em 2.1, as partículas cúbicas tendem a gerar misturas mais estáveis do que aquelas fabricadas com agregados lamelares.
- Textura superficial dos agregados: conforme mencionado em 2.1, as partículas que apresentam textura superficial lisa se re-orientam mais facilmente que aquelas com textura superficial rugosa, porque estas resistem mais ao deslizamento entre si.
- Graduação dos agregados: os vazios gerados por agregados maiores podem ser preenchidos pelos menores, quando a mistura for composta por diferentes tamanhos de agregados.
- Resistência dos agregados: a degradação, que é diretamente dependente da resistência dos agregados, ocorre desde a compactação e também durante toda a vida do pavimento, por ação das cargas impostas pelo tráfego.

### 2.2.3 Agregado Graúdo e Miúdo

No meio rodoviário, agregado graúdo, é definido como toda partícula retida na peneira 4,75 mm e aqueles que passam por essa peneira são definidos como agregados miúdos, independente do tamanho máximo nominal (TMN) da mistura.

Para o método Bailey, a definição de agregado graúdo e miúdo depende do tamanho máximo nominal da mistura, pois os agregados graúdos são aqueles que formam vazios quando colocados em um volume definido e os agregados miúdos são aqueles capazes de preencher os vazios criados pelos agregados graúdos presentes na mistura.

Para poder diferenciar os agregados graúdos e miúdos, o método Bailey utiliza a Peneira de Controle Primário (PCP), que se baseia no tamanho máximo nominal da mistura (TMN).

A peneira de controle primário (PCP) é definida pela Equação 1.

$$PCP = TMN \times 0,22 \quad (1)$$

Onde:

PCP = Peneira de Controle Primário;

TMN = Tamanho Máximo Nominal.

Através de análises em duas (2D) e três dimensões (3D) do arranjo de agregados de diferentes formas, chegou-se a fatores entre 0,18 e 0,28 que poderiam ser utilizados na Equação 1, sem afetar a análise da granulometria. No entanto, padronizou-se o valor de 0,22 (VAVRIK et al., 2001).

### 2.2.4 Combinação de agregados por volume

Uma mistura asfáltica sempre conterà vazios oriundos, dentre outros fatores, da compactação utilizada na fabricação da mistura e das características de arranjo da mistura.

Na combinação de agregados, deve-se determinar a quantidade e o tamanho dos vazios criados pelos agregados graúdos e buscar preenchê-los com agregado miúdo em quantidade apropriada.

Apesar dos métodos de dosagem se basearem quase sempre em fatores volumétricos, os agregados acabam sendo combinados por peso, a fim de facilitar o processo. Quando necessário, corrige-se a porcentagem passante em peso pela porcentagem passante em volume.

Para avaliar o intertravamento das misturas, é necessário conhecer os dados volumétricos da estrutura de vazios. Para isso, é necessário determinar as massas específicas solta e compactada de cada agregado graúdo utilizado e a massa específica compactada de cada agregado miúdo empregado na mistura (VAVRIK et al., 2002).

#### 2.2.5 Massa Específica Solta do Agregado Graúdo

A massa específica solta é a quantidade necessária de agregados para preencher um recipiente sem qualquer tipo de esforço de compactação, representando o mínimo contato entre as partículas (Figura 5). O volume do recipiente é determinado em função do tamanho nominal máximo da mistura.

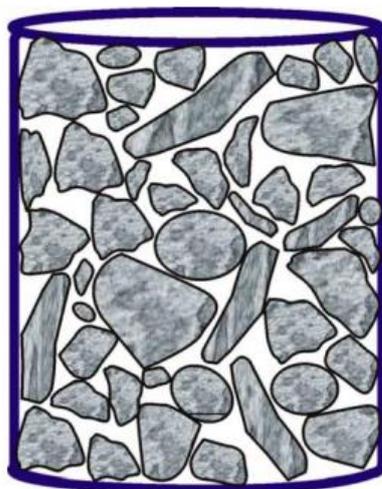


Figura 5 - Massa específica solta do agregado graúdo (VAVRIK et al., 2002).

A norma que prescreve esse ensaio é a AASHTO T-19: Massa Específica e Vazios no Agregado (AASHTO, 2009). Ao se dividir a massa de agregado pelo

volume do recipiente, obtém-se a massa específica solta. O volume de vazios na condição solta, que é aquela em que os agregados estão em mínimo contato, é obtido através da massa específica e da massa específica solta.

Para proceder ao ensaio, deve ser preenchido um recipiente com o agregado por meio de uma pá, até seu transbordamento, deixando que ele caia de uma altura que não ultrapasse 50 mm do topo do recipiente, evitando sua segregação. A superfície deve ser nivelada com os dedos ou com uma régua, de forma a equilibrar a quantidade de projeções dos pedaços maiores com a quantidade de vazios maiores logo abaixo da superfície.

A massa específica solta do agregado será determinada pela Equação 2.

$$M = \frac{G - T}{V} \quad (2)$$

Onde

M = Massa específica solta do agregado, kg/m<sup>3</sup>

G = Massa do agregado mais a massa do recipiente, kg

T = Massa do recipiente, kg

V = Volume da medida, m<sup>3</sup>

A determinação do volume de vazios se dá pela Equação 3.

$$\% \text{ Vazios} = \frac{100[(S \times W) - M]}{S \times W} \quad (3)$$

Onde:

M = Massa específica solta do agregado graúdo, kg/m<sup>3</sup>

S = Densidade aparente do agregado, kg/m<sup>3</sup>

W = Densidade da água, 998 kg/m<sup>3</sup>

#### 2.2.6 Massa Específica Compactada do Agregado Graúdo

A massa específica compactada é obtida através do preenchimento de um dado volume com um esforço de compactação, que aumenta o contato entre os agregados e reduz o volume de vazios (Figura 6).

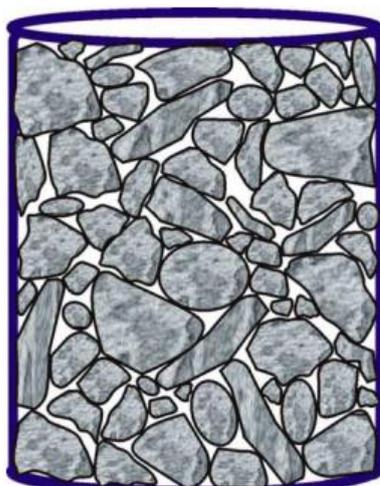


Figura 6 - Massa específica compactada do agregado graúdo (VAVRIK et al., 2002).

Do mesmo modo que a massa específica solta do agregado graúdo, a determinação da massa específica compactada é determinada segundo procedimento da AASHTO T-19: Massa Específica e Vazios no Agregado (AASHTO, 2009). Sua determinação ocorre pela divisão entre a massa de agregado pelo volume do recipiente. Nesta condição, os agregados encontram-se em maior contato, que foi provocado pelo esforço de compactação e seu volume de vazios pode ser determinado pela massa específica compactada e a massa específica aparente.

Para agregados com tamanho nominal máximo inferior a 37,5 mm, a massa específica compactada é determinada através do preenchimento inicial de um terço do volume utilizado, aplicando-se 25 golpes com uma haste de prensagem especificada na AASHTO T-19. Após a compactação dessa primeira camada, são colocadas mais duas outras, que devem preencher um terço da medida, além de serem compactadas com 25 golpes cada uma. Deve-se evitar que, na primeira camada, a haste toque o fundo do recipiente de maneira forçada e que nas outras duas camadas, a haste penetre a camada anterior de agregado.

Para agregados com tamanho nominal máximo superior a 37,5, o procedimento deverá ser feito através de gabarito. O recipiente deverá ser preenchido em três camadas, sendo que cada uma delas deverá ser compactada através da elevação e posterior queda dos lados opostos alternadamente sobre uma base firme. O recipiente deverá cair 50 vezes, 25 vezes de cada lado e a superfície deverá ser nivelada com os dedos ou com uma régua.

A determinação da massa específica compactada se dá através da Equação 4.

$$M = \frac{G - T}{V} \quad (4)$$

Onde

M = Massa específica compactada do agregado graúdo, kg/m<sup>3</sup>

G = Massa do agregado mais a massa do recipiente, kg

T = Massa do recipiente, kg

V = Volume da medida, m<sup>3</sup>

A determinação do volume de vazios se dá pela Equação 5.

$$\% \text{ Vazios} = \frac{100 [(S \times W) - M]}{S \times W} \quad (5)$$

Onde:

M = Massa específica compactada do agregado graúdo, kg/m<sup>3</sup>

S = Massa específica aparente do agregado, kg/m<sup>3</sup>

W = Densidade da água, 0,998

### 2.2.7 Massa Específica Escolhida de Agregado Graúdo

Ao seleccionar a quantidade de vazios da mistura, determina-se uma massa específica, que é a massa específica escolhida do agregado graúdo. Essa escolha leva à determinação do volume de agregado graúdo e também do grau de intertravamento da mistura.

Pela determinação da massa específica escolhida, é possível identificar se a mistura é graúda, onde seu esqueleto é formado por agregado graúdo; ou se ela é miúda, que são aquelas em que a quantidade de agregado graúdo não é suficiente para formar o esqueleto, que será formado pelo agregado miúdo (VAVRIK et al., 2002). A Figura 7 mostra algumas considerações para a determinação da massa específica escolhida.

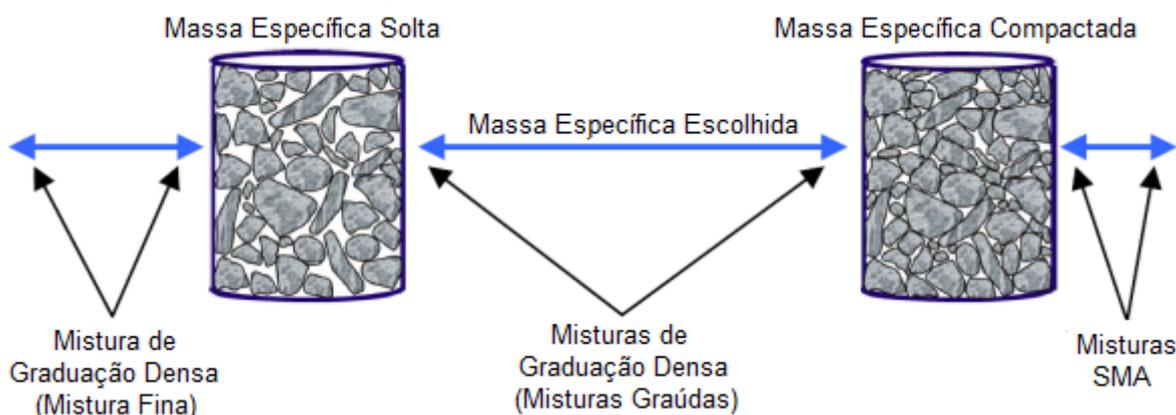


Figura 7 - Seleção da Massa Específica dos Agregados Graúdos (VAVRIK et al., 2002).

A massa específica escolhida deve estar de acordo com as necessidades da mistura e levar em consideração a graduação que se deseja dar a ela.

Em misturas de graduação densa, a massa específica escolhida é determinada como uma porcentagem da massa específica solta do agregado graúdo. Quando se deseja dar à mistura certo grau de intertravamento entre o agregado graúdo, como em misturas de graduação graúda, devem-se utilizar valores entre 95% e 105% da massa específica solta. No caso de agregados sujeitos à degradação, a massa específica escolhida deve se aproximar de 105% da massa específica solta, sendo que valores acima desse devem ser evitados devido à maior possibilidade de degradação do agregado e pela dificuldade de compactação em campo (VAVRIK et al., 2002).

Segundo Vavrik et al. (2001), valores entre 90% e 95% da massa específica solta devem ser evitados, porque possuem grande possibilidade de variação do grau de intertravamento dos agregados graúdos em campo, com tolerâncias permitidas pela PCP.

No caso de misturas com graduação miúda, a massa específica escolhida deve ser inferior a 90% da massa específica solta, garantindo que o esqueleto mineral seja predominantemente controlado pela estrutura de agregado miúdo (VAVRIK et al., 2001).

### 2.2.8 Massa Específica Compactada do Agregado Miúdo

Os vazios criados pelo agregado graúdo são preenchidos, em parte, pelos agregados miúdos utilizados na mistura, em sua condição de massa específica compactada. Na Figura 8, vê-se a massa específica compactada do agregado miúdo.

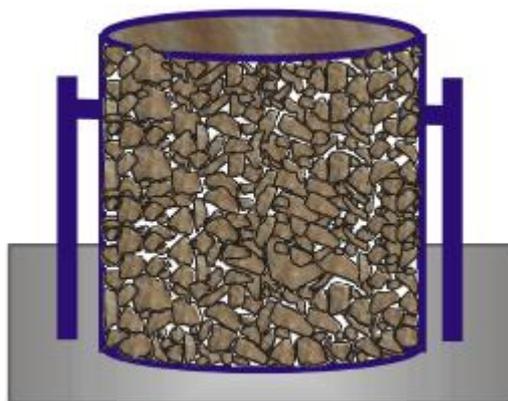


Figura 8 - Massa Específica Compactada do Agregado Miúdo (VAVRIK et al., 2002).

A AASHTO T-19: Massa Específica e Vazios no Agregado contém o procedimento para a determinação da massa específica compactada dos agregados miúdos (AASHTO, 2009). Para aqueles cujo TMN é igual ou inferior a 4,75 mm, utiliza-se um molde de metal proctor de 100 mm de diâmetro e volume aproximado de 0,9 litros. Para agregados acima com TMN acima de 4,75 mm, o recipiente deve ter volume determinado de acordo com a norma AASHTO T-19. A massa específica compactada é determinada pela divisão entre a massa do agregado e o volume do recipiente.

Para sua determinação, deve-se preencher o recipiente em três camadas, assim como descrito em 2.2.6, mas a compactação se dará através do impacto com uma base firme, como um piso de concreto, elevando-se os lados opostos cerca de 50 mm da superfície e deixando-o cair 25 vezes para cada lado. Após isso, nivelar a superfície do agregado com os dedos ou régua, equilibrando-se as projeções dos agregados com os vazios maiores na superfície logo abaixo da superfície.

A massa específica compactada do agregado miúdo será determinada através da Equação 6.

$$M = \frac{G - T}{V} \quad (6)$$

Onde

M = Massa específica compactada do agregado miúdo, kg/m<sup>3</sup>

G = Massa do agregado mais a massa do recipiente, kg

T = Massa do recipiente, kg

V = Volume da medida, m<sup>3</sup>

Segundo Vavrik et al. (2002), a massa específica compactada do agregado miúdo é necessária para determinar a quantidade de agregado miúdo necessária para preencher os vazios deixados pelo agregado graúdo, de acordo com a massa específica escolhida.

## 2.2.9 Determinação da granulometria utilizada

O Método Bailey pode ser utilizado tanto para as misturas de graduação graúda quanto para as finas. Os passos seguintes são apresentados de forma a criar um consenso para a determinação de uma mistura de agregados por volume e sua avaliação (VAVRIK et al., 2002):

1. Determinação da massa específica solta dos agregados graúdos, kg/m<sup>3</sup>.
2. Cálculo do volume de vazios nos agregados graúdos, na massa específica escolhida.
3. Utilizando a massa específica compactada dos agregados miúdos, em kg/m<sup>3</sup>, determinar a quantidade necessária de agregados miúdos para preencher esses vazios.
4. Usando a massa específica de cada agregado (em kg/m<sup>3</sup>), determinar o peso total e converter para porcentagens individuais na granulometria.
5. Corrigir os agregados graúdos para a quantidade de agregado miúdo que eles contêm e os agregados miúdos para a quantidade de agregado graúdo que eles contêm, a fim de manter a mistura adequada, em volume, para as quantidades de agregado graúdo e miúdo.
6. Determinar as porcentagens ajustadas da mistura, em peso, para cada agregado.

7. Caso sejam utilizados filler mineral ou material de enchimento, ajustar as quantidades de agregado graúdo de forma que as quantidades de agregado graúdo e miúdo estejam de acordo com a mistura desejada.
8. Determinar as porcentagens revisadas de agregado, em peso, para uso no cálculo da granulometria final.

Para facilitar a execução destes oito passos é utilizada uma planilha eletrônica, constante no Anexo C.

#### 2.2.10 Análise das misturas de projeto

Após a determinação da granulometria adotada de acordo com o item 2.2.9, analisa-se a disposição dos agregados, separando-se a mistura em três frações, que são avaliadas individualmente e podem ser vistas na Figura 9:

- A porção graúda, que vai desde a dimensão do maior agregado até a peneira de controle primário (PCP);
- A fração graúda do agregado miúdo, que vai da peneira de controle primário até a peneira de controle secundário (PCS), que é a peneira mais próxima do valor obtido da multiplicação do fator de 0,22 pelo diâmetro da PCP;
- A fração miúda do agregado miúdo, que é o material que passa na PCS

Ainda há as seguintes peneiras de controle, a Peneira Média (PM), que é aquela mais próxima da metade do tamanho máximo nominal (TMN); e a Peneira de Controle Terciário (PCT), que é obtida através da multiplicação da Peneira de Controle Secundário (PCS) pelo fator de 0,22.



Tabela 2– Peneiras de controle para diferentes Tamanhos Nominais de Mistura (TMN) (VAVRIK et al., 2002).

Tipos de Peneira	Tamanho Máximo Nominal (TMN), em mm					
	37,50	25,00	19,00	12,50	9,50	4,75
Meia Peneira (PM)	19,00	12,50	9,50	6,25	4,75	2,36
PCP	9,50	4,75	4,75	2,36	2,36	1,18
PCS	2,36	1,18	1,18	0,60	0,60	0,30
PCT	0,60	0,30	0,30	0,150	0,150	0,075

a) Proporção de Agregados Graúdos (Proporção AG):

É utilizada para avaliar o arranjo da proporção graúda e os vazios gerados por esta fração, sendo calculada de acordo com a Equação 7.

$$\text{Proporção AG} = \frac{(\% \text{ passante PM} - \% \text{ passante PCP})}{(100\% - \% \text{ passante PM})} \quad (7)$$

A proporção AG é o fator mais importante para a seleção da mistura, uma vez que sua redução aumenta a compactação da porção de agregado fino ao reduzir o número de partículas passantes pela PM, que são necessárias para limitar a compactação das partículas maiores de agregado miúdo (NASCIMENTO, 2008).

Quando o valor de AG se encontra abaixo da faixa recomendada na Tabela 1, as misturas resultantes são susceptíveis à segregação, além de precisar de uma estrutura resistente de agregados miúdos para atender às especificações volumétricas solicitadas.

Nos casos em que a fração AG atinge valores próximos de 1,0, os vazios no agregado mineral (VAM) também aumentam, uma vez que as partículas passantes pela PM tendem a controlar o esqueleto do agregado graúdo. Altos valores de AG resultam em misturas que apresentam dificuldade de compactação, devido à forma de sua curva granulométrica.

b) Proporção Graúda dos Agregados Finos (GAF):

O agregado passante na PCP pode ser visualizado como uma mistura que contém uma parte graúda e uma miúda, e cada uma delas pode ser analisada separadamente. A proporção graúda cria vazios que serão preenchidos pela proporção miúda do agregado miúdo adequadamente. A Equação 8 descreve a fórmula para a determinação da proporção GAF.

$$\text{Proporção GAF} = \frac{(\% \text{ passante na PCS})}{(\% \text{ passante na PCP})} \quad (8)$$

Quando o valor dessa proporção aumenta, o volume na proporção miúda é maior e o agregado miúdo, passante na PCP, se arranja de maneira mais compacta. É desejável que as misturas tenham valores de GAF inferiores a 0,50, evitando o excesso da proporção miúda dos agregados miúdos. As misturas cujo valor sejam superiores a 0,50 são potencialmente inadequadas quando analisadas no gráfico da curva de graduação na potência de 0,45.

Valores inferiores aos descritos na Tabela 1, resultam em graduações não uniformes, indicando instabilidade e dificuldade de compactação em campo. Tem impacto sobre o VAM da mistura, visto que sua redução leva a um aumento do VAM.

c) Proporção Miúda do Agregado Miúdo

Responsável pelo preenchimento dos vazios gerados pela proporção graúda do agregado miúdo e indica como a proporção fina do agregado fino é compactada. A fórmula para o seu cálculo está na Equação 9.

$$\text{Proporção FAF} = \frac{(\% \text{ passante na PCT})}{(\% \text{ passante na PCS})} \quad (9)$$

Similarmente ao que ocorre com a proporção GAF, seu decréscimo também leva a um acréscimo no VAM da mistura e seu valor deve ser inferior a 0,50 para misturas densas.

#### d) Misturas Recomendadas pelo Método Bailey

Para a determinação da influência dos parâmetros adotados pelo Método Bailey, Vavrik et al.(2002) recomendam a elaboração de três misturas modificando-se os seguintes parâmetros na mistura inicial dosada por esse método:

- Aumento de 5% na Massa Específica Escolhida (MEE): aumenta a quantidade de agregado graúdo na mistura, aumentando o intertravamento do agregado e a resistência à compactação;
- Aumento de 0,2 na Proporção AG: misturas cuja proporção AG é muito baixa são propensas à segregação e valores elevados para essa proporção podem indicar misturas desequilibradas;
- Redução de 0,05 na Proporção FAF: tem influência sobre as propriedades volumétricas da mistura asfáltica.

Neste trabalho, serão elaboradas as misturas com alteração na Massa Específica Escolhida e com aumento de 0,2 na proporção AG.

#### 2.2.10 Considerações Finais Sobre o Método Bailey

Segundo Cunha (2004), para misturas dosadas com o Método Bailey, obtiveram-se maiores valores de vazios no agregado mineral e de relação betume vazio do que misturas dosadas por métodos tradicionais, o que indica misturas menos propensas a deformações permanentes e potencialmente mais resistente às trincas por fadiga. Além disso, as misturas dosadas com o método Bailey, apresentaram menores valores da relação entre o módulo de resiliência e a resistência à tração, indicando equilíbrio entre a resistência à deformação permanente e às trincas por fadiga.

Na realização de seu trabalho, Gouveia (2006) constatou que mesmo utilizando agregados com diferentes características de forma e angularidade, poderia, através da utilização do Método Bailey, obter misturas com características volumétricas similares, destacando a capacidade do método na consideração de propriedades de superfície das partículas na obtenção de curvas granulométricas.

Em seu trabalho, Marques (2004) não aplicou a metodologia Bailey para a seleção das granulometrias das misturas estudadas, mas foram calculados os parâmetros granulométricos preconizados pelo método (Proporções AG, GAF e FAF) para caracterizar a granulometria das misturas e então utilizá-los nos modelos de desempenho obtidos para o Módulo de Resiliência, objeto de seu estudo.

Bardini (2008) utilizou o Método Bailey para caracterizar os agregados empregados no seu estudo sobre a viabilidade do emprego de cinza da queima da casca de Pinus em obras de pavimentação asfáltica. Ildfonso (2007) investigou a possibilidade do aproveitamento do copolímero etileno acetato de vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista em misturas asfálticas, por processo a seco; utilizando o Método Bailey para a composição das curvas granulométricas.

## 2.3 COMPACTAÇÃO GIRATÓRIA

### 2.3.1 Histórico

Até a década de 1950, os métodos de dosagem predominantemente utilizados eram o Marshall e o Hveem, que se baseavam na compactação das misturas por impacto. No Brasil, a compactação Marshall ainda é a mais utilizada e consiste na aplicação de um número definido de golpes com um soquete que cai de uma altura pré-determinada sobre a amostra de mistura asfáltica dentro de um cilindro padronizado.

Atribui-se aos engenheiros Philippi, Raines e Love o desenvolvimento do conceito de compactação giratória. Na década de 1930, o Departamento de Rodovias do Estado do Texas, iniciou uma pesquisa relativa ao projeto e controle de misturas asfálticas, com a finalidade de substituir o método de compactação por impacto utilizado até então (HARMAN et al., 2002).

O método resultante dessa pesquisa deveria, primeiramente, ser adaptável ao projeto e ao controle de campo das misturas e, além disso, deveria produzir misturas com a mesma densidade ou índice de vazios daquelas obtidas no pavimento acabado e tentar se aproximar ao máximo das condições de degradação dos agregados do pavimento, ao longo de sua vida útil.

Na década de 1950, John L. McRae, juntamente ao Corpo de Engenheiros do Exército Norte-Americano, desenvolveu um compactador giratório por amassamento, uma vez que as pesquisas realizadas demonstraram que o método Marshall não simulava adequadamente a densidade das misturas nas trilhas de roda e as propriedades mecânicas das misturas de laboratório não eram correspondentes às daquelas das misturas retiradas da pista (HARMAN et al., 2002).

O equipamento desenvolvido induz a ação giratória através de um sistema de dois pontos, que permite ao ângulo de giro ser modificado durante a compactação, que é medido durante o processo. Além do ângulo de giro, o sistema permite a leitura da pressão no sistema e a altura da amostra. O dispositivo do Corpo de Engenheiros ficou conhecido como Giratory Test Machine (GTM).

Considerando as pesquisas desenvolvidas no Texas, o LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), na França, desenvolveu um compactador giratório que utiliza uma Prensa de Cisalhamento Giratório (PGC), que possui uma parte externa fixa capaz de gerar um ângulo de  $1^\circ$  à parede do molde e pressão de compactação de 600kPa. O compactador desenvolvido pelo LCPC é utilizado na fase inicial dos processos de dosagem, para otimizar as misturas propostas e foi adotado pelo conselho de pavimentação asfáltica da Europa (MARQUES, 2004).

A FHWA (Federal Highway Administration), em 1990, utilizou um laboratório móvel para levar a diversas partes dos Estados Unidos as propostas do SHRP (Strategic Highway Research Program), que inicialmente era voltado para as misturas asfálticas, mas que em 1990 passou a estudar os componentes das misturas (NASCIMENTO, 2008).

O Programa SHRP foi realizado entre 1987 e 1993 e teve por objetivo desenvolver métodos de análise de materiais betuminosos e de misturas asfálticas, baseando-se em propriedades que estão diretamente relacionadas ao desempenho dos pavimentos. A pesquisa foi coordenada pelos Estados Unidos e contou com a participação de diversos países, incluindo o Brasil. Os resultados obtidos com o programa foram compilados e patenteados sob a denominação SUPERPAVE (GOUVEIA, 2002).

Como o GTM, pela FHWA, teve seu uso considerado impraticável e de funcionalidade deficiente, desenvolveu-se um conceito híbrido para o compactador giratório, que deveria ser portátil e o ângulo de giro fixo, como no desenvolvido no

Texas e ainda que incorporasse o sistema de medição utilizado no GTM e no compactador desenvolvido pelo LCPC. Inicialmente, obteve-se um compactador giratório com essas características, mas com um alto valor do ângulo de compactação ( $6^\circ$ ), que levava a uma compactação rápida, mas que não permitia uma comparação da habilidade de compactação entre as misturas.

Em maio de 1991, a empresa Rainhart Company obteve licença para produzir um compactador giratório modificado, com o estilo francês e ângulo de giro de  $1^\circ$ , adaptado de uma máquina de testes giratórios do Texas, com 150 mm de diâmetro. Nos ensaios realizados no SHRP, em sua maioria, foi utilizado este equipamento modificado. (HARMAN et al., 2002).

Após as pesquisas realizadas pela FHWA, ficaram definidas como especificações finais para o compactador giratório uma pressão vertical de consolidação de 600 kPa, ângulo de giro de  $1,25^\circ$  e velocidade de giro de 30 rpm. O ângulo de giro foi modificado para o valor de  $1,25^\circ$ , porque as paredes dos CPs apresentavam  $1,23^\circ$  de inclinação e não  $1^\circ$  como havia sido projetado.

Segundo Harman et al. (2002), até o início dos anos 2000, existiam, nos Estados Unidos, cinco companhias responsáveis por produzir 8 diferentes modelos diferentes de compactador giratório, a fim de atender aos diferentes tipos de procedimentos de ensaio. Atualmente, calibram-se os equipamentos em função da pressão, da velocidade e do ângulo de giro.

Em agosto de 2010, a Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), com apoio da PETROBRAS, adquiriu um compactador giratório fabricado pela empresa Rainhart. O equipamento pertence ao Laboratório de Pavimentação tem a possibilidade de pressão de consolidação variável entre 200 e 1.000 kPa; velocidade de giro da mesa constante em 30 rpm; ângulo de giro também ajustável, variando entre  $0,5^\circ$  e  $2,0^\circ$ , mas com configuração de fábrica para  $1,25^\circ$ ; e os corpos de prova podem ser fabricados em duas dimensões de diâmetro, 150 mm e 100 mm.

### 2.3.2 SUPERPAVE

A metodologia de dosagem SUPERPAVE vem sendo adotada para misturas a quente produzidas nos Estados Unidos desde 1993, como reflexo do programa

SHRP. No Brasil, essa metodologia vem se difundindo ao longo do tempo, mas a metodologia Marshall ainda é a mais utilizada.

A proposta de metodologia de dosagem elaborada pelo programa SHRP diferiu-se das anteriores por estimar um teor de projeto provável através da fixação do volume de vazios e da granulometria dos agregados disponíveis, além da maior diferença entre elas: o método de compactação.

A metodologia SUPERPAVE modificou também a forma de escolha dos agregados, como visto na Figura 4, uma vez que criou os conceitos de pontos de controle por onde a mistura deve passar e a zona restrita, que caiu em desuso ao longo do tempo (BERNUCCI et al., 2007).

Para a determinação do número de giros de projeto ( $N_{projeto}$ ), que corresponde ao número de giros que o compactador giratório fará para produzir o corpo de prova. Essa determinação leva em consideração o tráfego (N) e encontra-se na Tabela 3.

Tabela 3– Parâmetros de Compactação – determinação do  $N_{projeto}$ , adaptado de Bernucciet al (2007)

<b>Número de Giros</b>	<b>Tráfego</b>
50	Muito leve (local)
75	Médio (vias principais, rodovias rurais)
100	Médio a alto (vias principais e rodovias rurais)
125	Alto volume de tráfego (interestaduais, muito pesados)

Para a determinação dos teores de projetos, segue-se o esquema apresentado na Figura 10.

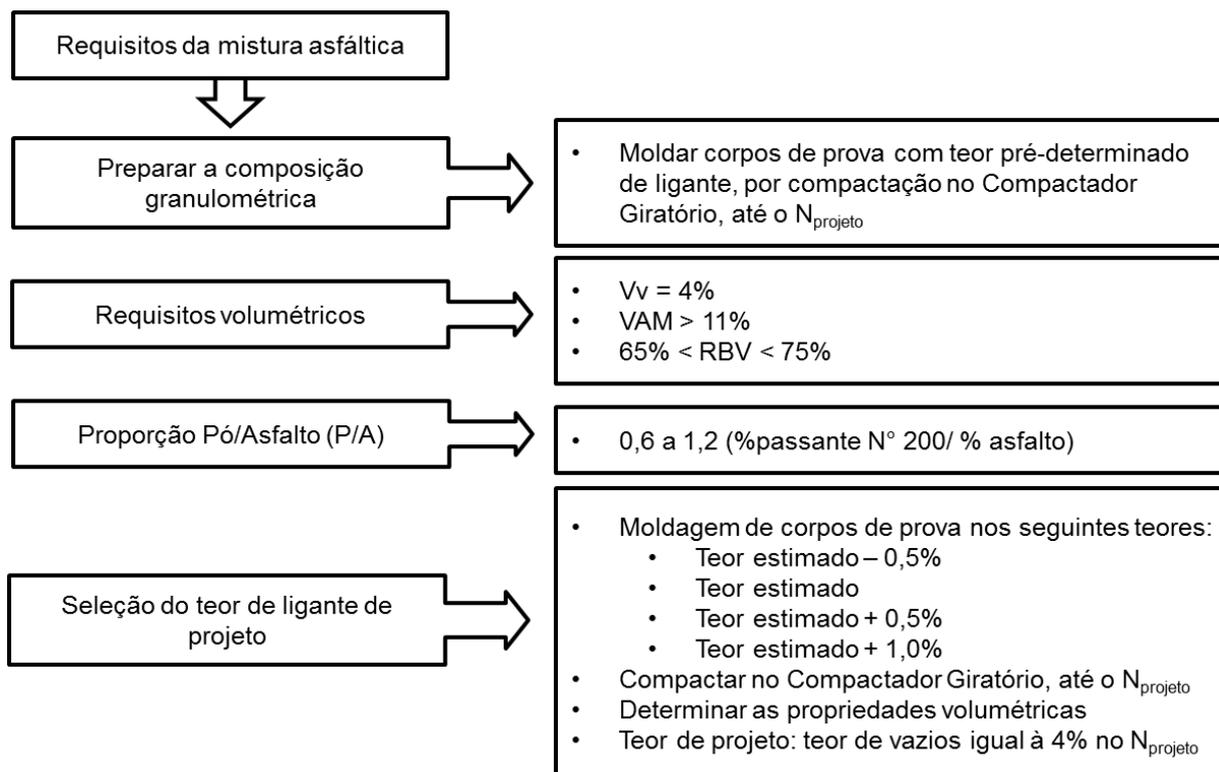


Figura 10 - Fluxograma para a obtenção do teor de projeto pelo método SUPERPAVE (Adaptado de: BERNUCCI et. al, 2007)

### 2.3.3 Compactador giratório SUPERPAVE

A arquitetura geral do compactador giratório SUPERPAVE (SGC) é formado, geralmente, pelos seguintes componentes, conforme pode ser visto no esquema da Figura 11.

- Uma estrutura de reação com base rotativa e motor, que é constituída por um pórtico não deformável onde é afixada a base do SGC, que suporta o molde e permite seu giro;
- Medidor de altura e sistema de registro de dados e de carregamento, cabeça de carga, medidor de pressão;
- Molde e placa base.

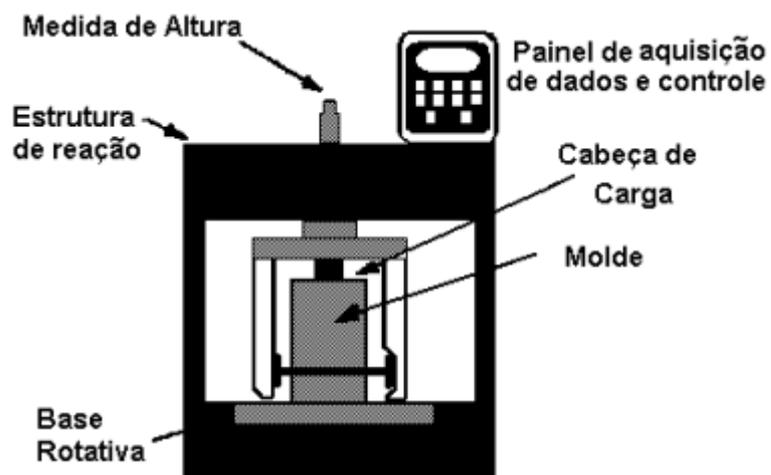


Figura 11 - Esquema do compactador giratório SUPERPAVE (MOTTA et al., 1996).

Na Figura 12, pode ser visto o compactador giratório do Laboratório de Pavimentação da UFJF, que segue o padrão recomendado pelo SHRP, porém o sistema de aquisição de dados é via computador e a medição da altura do corpo de prova é interna, mediante leitura contínua da altura da face do pistão.



Figura 12– Compactador Giratório do Laboratório de Pavimentação da UFJF, composto por um sistema de aquisição de dados e o compactador de misturas (Fonte: o autor)

A cabeça de carga é responsável por fazer a compressão do corpo de prova e possui diâmetro nominal correspondente ao diâmetro interno do molde, que pode ser de 100 mm ou 150 mm. A utilização de mancais permite o posicionamento do molde no ângulo de giro, que foi definido em  $1,25^\circ$ . A velocidade de giro, de 30 rpm, é acionada por um motor elétrico, que atua sobre a base rotativa. A pressão de 600 kPa é aplicada na cabeça de carga por um sistema hidráulico ou mecânico.

Durante a compactação, a pressão da cabeça de carga é medida, e conforme o corpo de prova vai se adensando, o sistema de carregamento é acionado para ajustar a posição da cabeça de carga, mantendo a pressão de compactação constante. A variação da altura da cabeça de carga é igual à variação da altura do corpo de prova, que é processada através de uma conexão serial com um computador. Na Figura 13, encontram-se as configurações finais do molde SGC e dos parâmetros de compactação adotados pelo SHRP e que são seguidos pelo compactador giratório da UFJF.

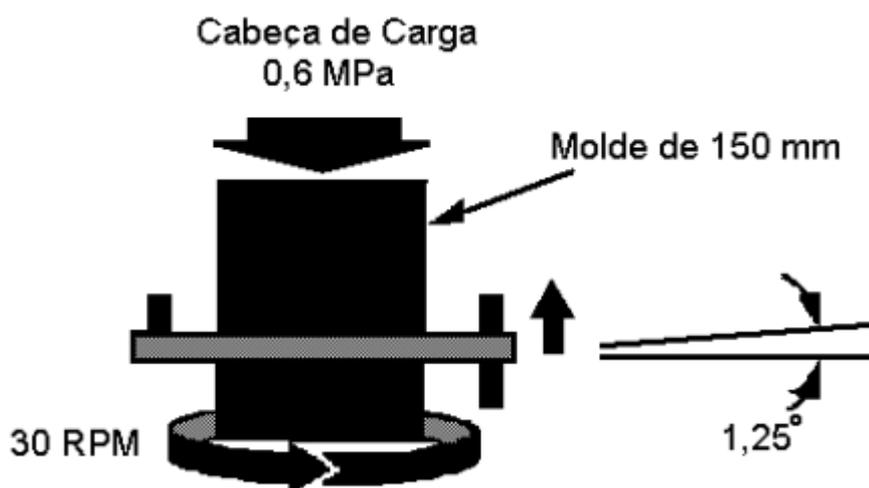


Figura 13– Configurações do SGC e parâmetros de compactação (MOTTA et al., 1996)

O arquivo gerado pelo processamento interno do SGC é uma tabela que relaciona a altura total do corpo de prova dentro do molde para cada giro. A densidade aparente da amostra pode ser determinada para um determinado número de giros, uma vez que a altura do corpo de prova é determinada a cada giro, mas deve-se levar em conta que o volume verdadeiro da amostra é levemente inferior ao volume calculado, devido às irregularidades superficiais.

A curva de densificação obtida em uma compactação giratória relaciona a porcentagem da densidade máxima ( $\%G_{mm}$ ) com o número de giros. A densidade máxima da mistura ( $G_{mm}$ ) é definida como a máxima densidade possível, desconsiderando a presença de vazios. A diferença percentual entre esta densidade e a densidade aparente, corresponde ao teor de vazios. O parâmetro  $\%G_{mm}$  representa o crescimento da densificação, ou seja, a redução dos vazios na amostra à medida que vai sendo compactada (MARQUES, 2001).

Na Figura 14 encontra-se uma típica curva de densificação obtida de um compactador giratório, mostrando a variação da densidade máxima ( $\%G_{mm}$ ) em relação ao número de giros. Na Tabela 4 constam os dados obtidos com o compactador giratório e que deram origem à curva mostrada na Figura 14, mas alguns dados foram suprimidos, a fim de tornar a tabela menos extensa.

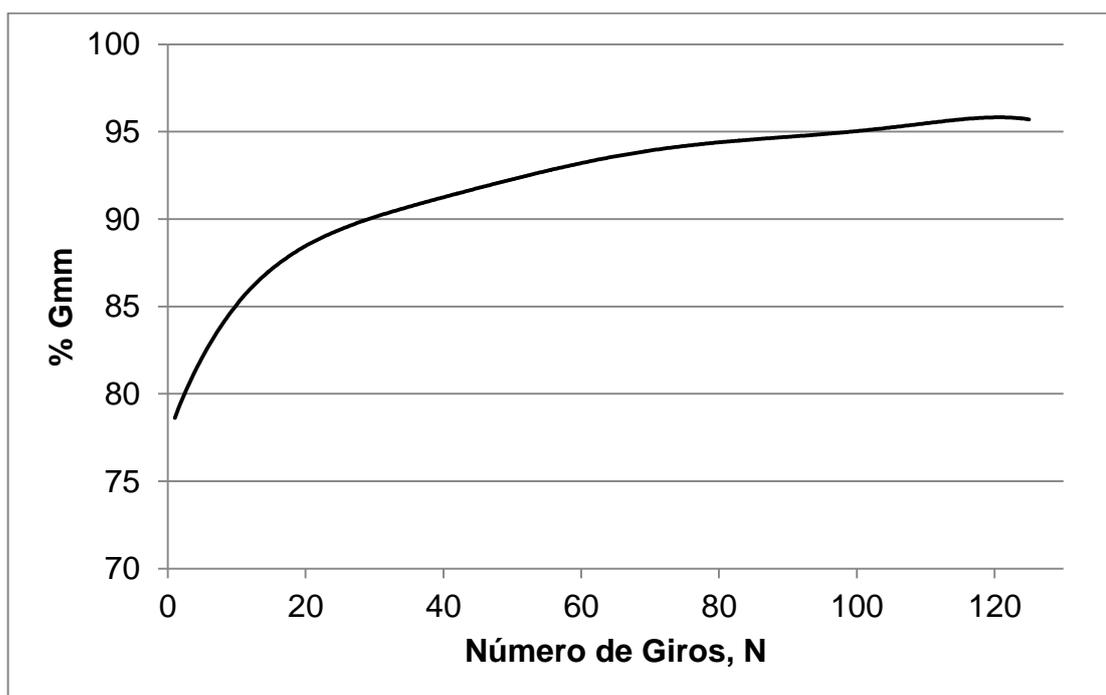


Figura 14– Curva de Densificação obtida com o compactador giratório para o corpo de prova número 82 (Fonte: o autor)

Tabela 4– Tabela com os dados obtidos pelo compactador giratório (Fonte: o autor).

Mistura: Tradicional				
Teor de Projeto:		5,14		
Corpo de Prova 82				
Massa Seca = 1180,4 g	Massa úmida = 1183,2 g		Massa Imersa = 695,5 g	Densidade Aparente = 2,420
Fator de Correção	Gmm	Massa Seca (g)	Gmb medida	Diâmetro (cm)
<b>1,04</b>	<b>2,524</b>	<b>1180,4</b>	<b>2,420</b>	<b>10,0</b>
Giros (N)	H (mm) - Altura Estimada pelo Compactador	Gmb est - Densidade Estimada a partir da altura	Gmb corr - Densidade Corrigida	% Gmm
1	79,7	1,890	1,958	77,6%
2	78,0	1,932	2,001	79,3%
3	76,6	1,967	2,038	80,7%
4	76,0	1,983	2,054	81,4%
5	74,9	2,010	2,082	82,5%
6	74,3	2,028	2,101	83,2%
7	73,6	2,046	2,119	84,0%
8	73,3	2,056	2,130	84,4%
9	72,8	2,068	2,142	84,9%
10	72,4	2,080	2,155	85,4%
20	69,9	2,155	2,233	88,5%
30	68,8	2,189	2,268	89,8%
40	67,5	2,230	2,310	91,5%
50	66,8	2,254	2,335	92,5%
60	66,3	2,272	2,354	93,3%
70	65,9	2,287	2,369	93,9%
80	65,6	2,297	2,380	94,3%
90	65,2	2,310	2,393	94,8%
100	65,0	2,317	2,400	95,1%
110	64,6	2,330	2,414	95,6%
120	64,7	2,328	2,411	95,5%
121	64,4	2,338	2,423	96,0%
122	64,6	2,332	2,416	95,7%
123	64,5	2,336	2,420	95,9%
124	64,5	2,336	2,420	95,9%
125	64,5	2,336	2,420	95,9%

A tabela mostra, nas duas primeiras colunas, os dados obtidos pelo compactador giratório utilizado neste trabalho: o número de giros (N) do equipamento e a altura estimada (H). As demais colunas são calculadas de acordo

com os dados obtidos com a determinação dos parâmetros volumétricos de cada corpo de prova.

#### 2.3.4 Parâmetros obtidos do Compactador Giratório

O desempenho dos pavimentos relaciona-se com as propriedades mecânicas, mas, assim como outras metodologias, a metodologia de dosagem SUPERPAVE considera apenas parâmetros volumétricos. Apesar de alguns trabalhos realizados na tentativa de determinar o comportamento mecânico das misturas asfálticas, estes ensaios requerem novos equipamentos, implicando em novos custos e treinamento extensivo antes de sua operacionalização (MAHMOUD e BAHIA, 2004).

Sabendo-se que o SGC é o principal componente da metodologia de dosagem pelo SHRP, deseja-se utilizá-lo para a obtenção de propriedades mecânicas de misturas asfálticas. A correta interpretação dos dados oriundos da compactação pode levar ao estabelecimento de parâmetros suplementares à atual dosagem, que é puramente volumétrica (MAHMOUD e BAHIA, 2004).

Além disso, algumas misturas geradas pela dosagem SUPERPAVE, apresentam dificuldade de compactação em campo, requerendo compactação ou equipamentos adicionais. Segundo Nascimento (2008), o uso de parâmetros ou requisitos relacionados com a trabalhabilidade das misturas e baseados em desempenho, pode servir de complemento aos procedimentos de dosagem utilizados atualmente.

Através das curvas de compactação giratória, foram propostos alguns índices como o Compaction Densification Index (CDI) e o Traffic Densification Index (TDI), utilizados para tentar definir melhor um projeto de mistura asfáltica.

##### a) Compaction Densification Index (CDI)

O Compaction Densification Index (CDI) é definido como a área sob a curva de densificação obtida com o SGC, a partir do oitavo giro ( $N = 8$ ) até 92% da  $G_{mm}$ . Este índice é referente ao trabalho aplicado pela acabadora ou pelos rolos para compactar a mistura na densidade requerida para a construção. Na Figura 15, encontra-se a representação do CDI.

O número de oito giros é utilizado para simular o esforço aplicado por uma vibro-acabadora típica durante o processo de espalhamento do material em pista, quando a pista é aberta ao tráfego de veículos, de acordo com especificações americanas. Misturas com valores ideais de CDI apresentam melhor compatibilidade enquanto aquelas que apresentam baixos valores têm problemas de estabilidade, devendo ser evitadas (NASCIMENTO, 2008).

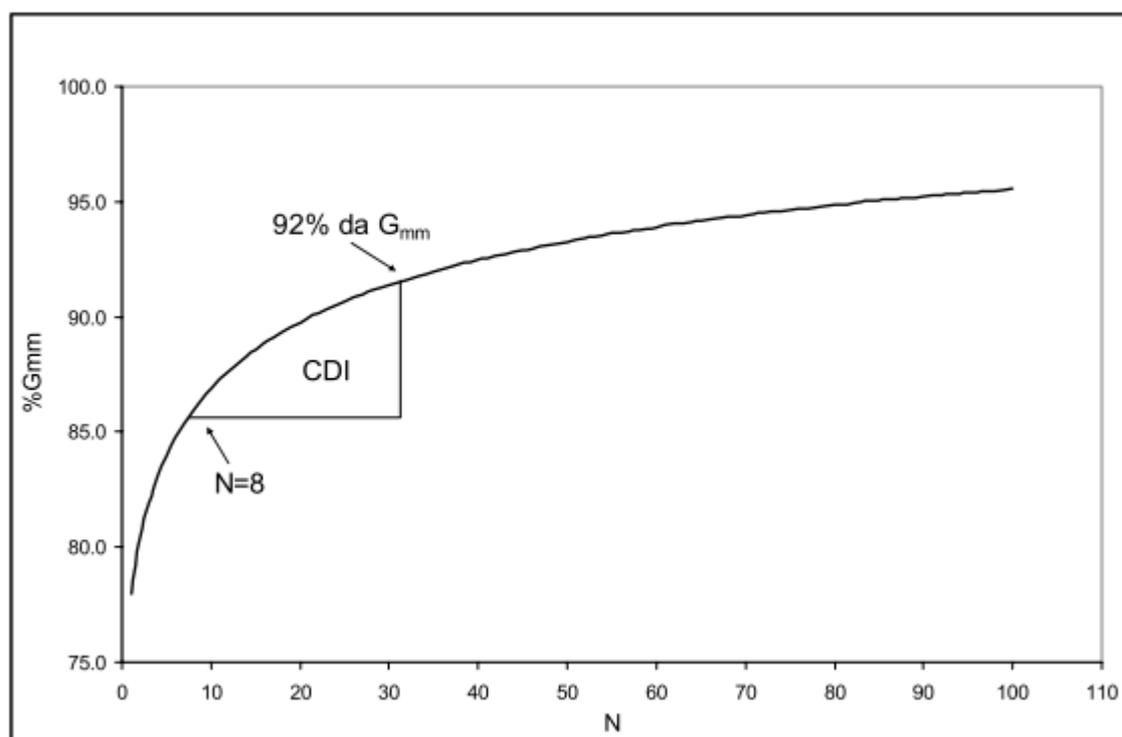


Figura 15– Representação gráfica do CDI (NASCIMENTO, 2008)

#### b) Traffic Densification Index (TDI)

O Traffic Densification Index (TDI) representa a quantidade de esforços requeridos para densificar a mistura entre 92% e 96% do Gmm, sendo definido pela área sobre a curva entre estes dois pontos. Esse índice se justifica pelo fato da mistura continuar a se densificar sob a ação da carga do tráfego, a 92% da Gmm (MARQUES et. al, 2009).

Ainda segundo estes autores, o procedimento de dosagem SUPERPAVE requer que a mistura esteja compactada a 96% da Gmm, ou seja, com 4% de vazios, no número de giros de projeto ( $N_{projeto}$ ), que é o valor esperado a se alcançar sob tráfego na vida inicial.

Bahia et al (1998) propuseram outra alternativa para a obtenção do TDI, definido como a área abaixo da curva de densificação a partir de 92% da  $G_{mm}$  até 98% da mesma, o  $TDI_{terminal}$ . Este índice se baseia no fato do pavimento continuar a se densificar após sua liberação ao tráfego, pelas cargas impostas pelos veículos (NASCIMENTO, 2008). Este índice representa a condição de densidade crítica na qual a mistura está dentro da zona plástica de ruptura. Na Figura 16, encontra-se um exemplo da representação gráfica do TDI.

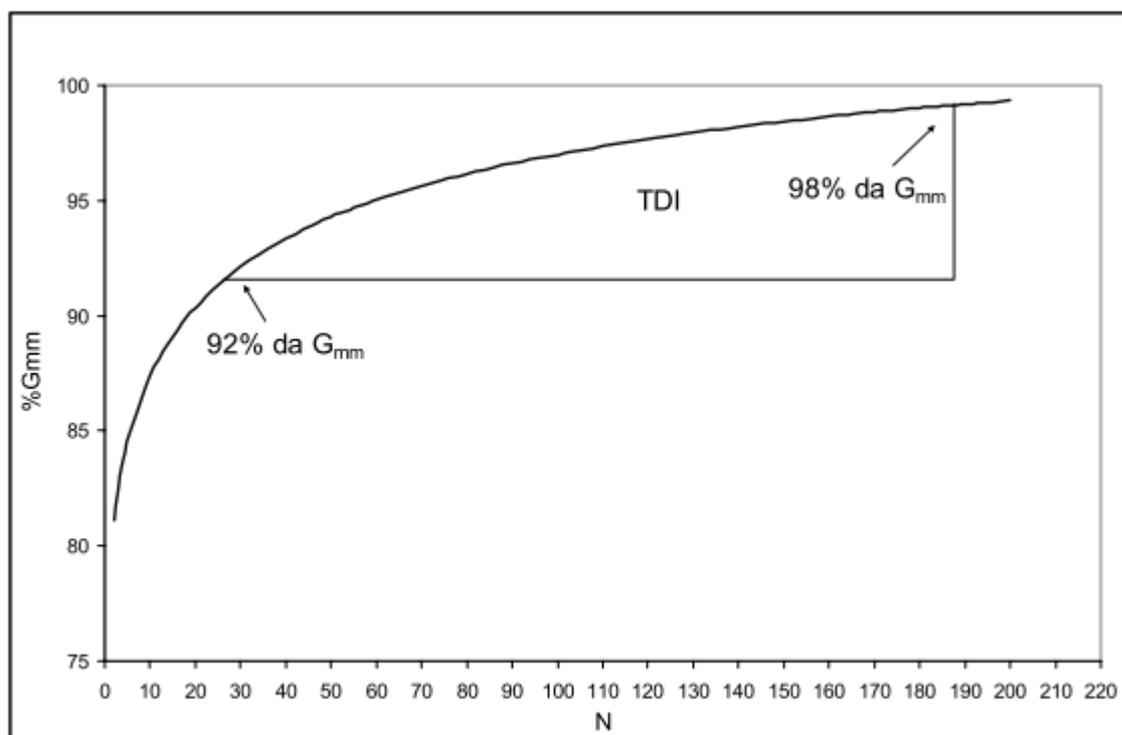


Figura 16– Representação gráfica do TDI (NASCIMENTO, 2008)

Para elaboração deste trabalho, considerou-se a obtenção do TDI a 96% da  $G_{mm}$ , uma vez que a obtenção do  $TDI_{terminal}$  é complicada e os corpos de prova compactados até 98% da  $G_{mm}$  não podem ser aproveitados para a elaboração de ensaios mecânicos.

#### 2.3.4 Considerações Finais Sobre os Índices Obtidos com a Compactação Giratória

Marques et al. (2009) em seu trabalho, verificaram que os índices CDI e TDI podem ser utilizados como indicador de desempenho de misturas asfálticas com

relação à facilidade de densificação inicial (compactação de campo) e final (compactação pelo tráfego), através do uso da curva de densificação. Esses índices podem, então, ser utilizados como critério de seleção de misturas suficientemente trabalháveis (baixos valores de CDI) e resistentes à densificação posterior em campo sob tráfego (altos valores de TDI), representando boa perspectiva de utilização da compactação giratória.

Ainda segundo esses autores, dentro das misturas estudadas, notou-se facilidade de densificação inicial em misturas mais densas e maior dificuldade de compactação em misturas mais abertas. Pode-se ainda relacionar os valores de Módulo de Resiliência (MR) a esses índices, uma vez que esse fator é crescente à medida que o parâmetro TDI aumenta e decrescente à medida que o valor de CDI diminui.

Segundo Nascimento (2008), os índices CDI e TDI são sensíveis ao grau de intertravamento do esqueleto pétreo e também ao teor de ligante asfáltico. Em misturas asfálticas preparadas com ligantes de diferentes propriedades, mas com os mesmos agregados (granulometria e origem), os resultados obtidos para o valor de CDI foram praticamente os mesmos, reforçando que este índice está intimamente relacionado aos agregados. Como o autor obteve fortes correlações entre o TDI e o CDI, é provável que ele também independa do tipo de ligante asfáltico.

Baseando-se nos resultados apresentados em seu trabalho, Nascimento (2008) recomenda alguns critérios para a dosagem de misturas asfálticas densas utilizadas como camada de revestimento em rodovias brasileiras, visando desempenho adequado com relação à deformação permanente:

- a) Tráfego Médio:  $CDI > 50$  e  $TDI > 250$ ;
- b) Tráfego Pesado:  $CDI > 50$  e  $TDI > 400$ .

Ressalta-se que são recomendações iniciais e que outros requisitos também devem ser levados em consideração para as dosagens.

## 2.4 ENSAIOS MECÂNICOS

A caracterização de misturas e de outros materiais de pavimentação até os dois primeiros terços do século XX, era totalmente empírica, correspondendo às

abordagens de dimensionamento dos pavimentos, tais como o método CBR e o método da AASHTO. Em se tratando de misturas asfálticas, os ensaios consagrados correspondem às estabilidades Marshall e Hveem (BERNUCCI et al., 2007).

Considerando-se a dosagem de misturas asfálticas no Brasil, o método Marshall ainda é bastante utilizado, até mesmo no meio técnico, por sua facilidade de aplicação. No entanto, o único ensaio que estabelece parâmetros mecânicos é o de estabilidade e fluência, sendo que seus limites são totalmente empíricos.

A fim de caracterizar melhor as misturas obtidas, serão realizados os seguintes ensaios mecânicos: módulo de resiliência, creep estático e vida de fadiga, que serão descritos a seguir.

Todos os ensaios mecânicos supracitados foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Juiz de Fora em equipamento adquirido recentemente para a realização de ensaios dinâmicos em misturas asfálticas. O equipamento é capaz de realizar os ensaios de Módulo de Resiliência, Resistência à Tração, Creep Estático e Vida de Fadiga, sendo composto por dois módulos interligados: um sistema pneumático para a aplicação de cargas e um sistema de controle e aquisição de dados, designado SiCAEP (GENELHU, 2009).

O SiCAEP é composto por um conjunto de quatro programas, SICTRI1, MR1, CREEP1 e FADIGA1, que são assim divididos:

- SICTRI1: condicionamento, ensaio triaxial e deformação permanente;
- MR1: módulo resiliente de misturas betuminosas;
- CREEP1: creep estático e creep dinâmico;
- FADIGA: vida de fadiga.

#### 2.4.1 Módulo de Resiliência

Na década de 1930, Francis Hveem deu início aos estudos sobre o comportamento resiliente dos materiais usados em pavimentação, tendo definido o termo resiliência como a “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações”.

O módulo de resiliência (MR) é análogo ao módulo de elasticidade (E), sendo a relação entre tensão ( $\sigma$ ) e deformação ( $\epsilon$ ). A diferença entre os dois está na sua

determinação, porque o módulo de resiliência é determinado por aplicação de carga repetida (MEDINA e MOTTA, 2005).

No Brasil, a obtenção do módulo de resiliência (MR) é padronizado pela DNIT-ME 135/2010 (DNIT, 2010). Baseando-se na norma do DNIT, a Comissão de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP) está elaborando uma proposição de especificação ABNT (BERNUCCI et al., 2007).

Segundo esta norma,

O módulo de resiliência (MR) de misturas betuminosas é a relação entre a tensão de tração ( $\sigma_t$ ), aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica betuminosa e a deformação específica recuperável ( $\epsilon_t$ ) correspondente à tensão aplicada, numa dada temperatura (T).

Para a realização do ensaio, o corpo de prova pode ser fabricado em laboratório ou extraído em campo e deve ter formato cilíndrico, tendo aproximadamente 10 cm de diâmetro e altura entre 3,5 cm e 6,5 cm.

Para proceder ao ensaio, liga-se a câmara de temperatura a 25°C, acondicionando-se os corpos de prova em seu interior. Assim, como demonstrado na Figura 17, posiciona-se o LVDT com o suporte adequado no corpo de prova, de forma a mantê-lo na posição horizontal. O corpo de prova, então, é colocado entre os frisos de carga do equipamento, buscando-se alinhamento vertical e horizontal, além da centralização do cilindro de carga com o corpo de prova (Figura 18) (GENELHU, 2009).



Figura 17– Montagem do suporte do LVDT (GENELHU, 2009)

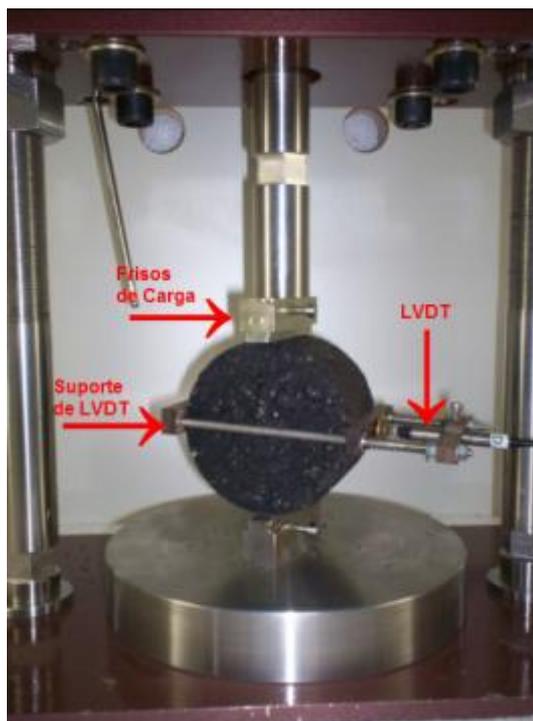


Figura 18– Esquema de montagem do ensaio de Módulo de Resiliência (GENELHU, 2009)

Com o corpo de prova devidamente posicionado e a temperatura da câmara em equilíbrio, dá-se início ao ensaio para a obtenção do Módulo de Resiliência, conforme a Figura 19, que mostra a tela onde são inseridos os dados para que se possa dar início ao ensaio.

O ensaio é realizado em três ciclos, que são os pulsos para o condicionamento do corpo de prova. O programa começa aplicando uma tensão inicial de  $0,50 \text{ kgf/cm}^2$ , sendo incrementada por  $0,25 \text{ kgf/cm}^2$  até que o deslocamento elástico atinja o valor de  $0,003 \text{ mm}$ , que é a sensibilidade do aparelho. Ao atingir esse valor, conforme Figura 20 onde o ensaio já começou, a tensão de compressão do cilindro estabiliza-se e são aplicados os três ciclos de carga para este nível de tensão, com 10 pulsos de carga cada. Ao final do ensaio, na tela do programa aparece o resultado do valor do módulo de resiliência em MPa para cada ciclo e também a média dos valores obtidos.

Conforme se pode observar nas Figuras 19 e 20, as telas dos programas, assim como os relatórios obtidos com o programa apresentam alguns erros na representação das unidades e em alguns termos utilizados. Os dados das telas e dos relatórios, em sua maioria, não podem ser alterados.

SICAEP - Módulo de Resiliência - Dados do Ensaio

Nome do Arquivo: C:\dados\Lar\160.dat

**Dados do Ensaio**

Amostra: 160 Origem: Laboratório C.P. Nº: 160  
 Rodovia: - Trecho: - Est / Km: -  
 Operador: Jorge Interess.: Larissa Data: 07/06/2011  
 Diâmetro do C.p. [cm]: 10.00 Temperatura.: 25 °C Altura do C.p. [cm]: 6.54  
 Observações:

**Constantes**

Deslocamento (mm/V) Tr. Pressão [(Kg/cm2)/V]  
 LVDT B1 : 0.108 Constante: 2.3704 (Kg/cm2)/V  
 LVDT B2 : 0.1084 Valor Inicial: 1.086 Volts

**Constantes p/ correção de pressão do pistão**

$P = F * (X) + (Y)$   
 Pr. [Carreg. Estático] 0.0082 (X) -0.0023 (Y)  
 Pr. [Carreg. Dinâmico] 0.0082 (M) 0.0186 (N)

$F = P * (Z) + (W)$   
 Força [Carr. Estático] 122.1800 (Z) 0.3706 (W)  
 Força [Carr. Dinâmico] 122.0300 (O) -2.1717 (P)

Cilindro em Uso: **125**

Acesso K

Cilindro 125mm  
 Cilindro 160mm

1 LVDT  
 2 LVDTs

Continuar  
 Retornar

Figura 19 – Tela para a entrada de dados para a realização do ensaio de Módulo de Resiliência (Fonte: o autor)

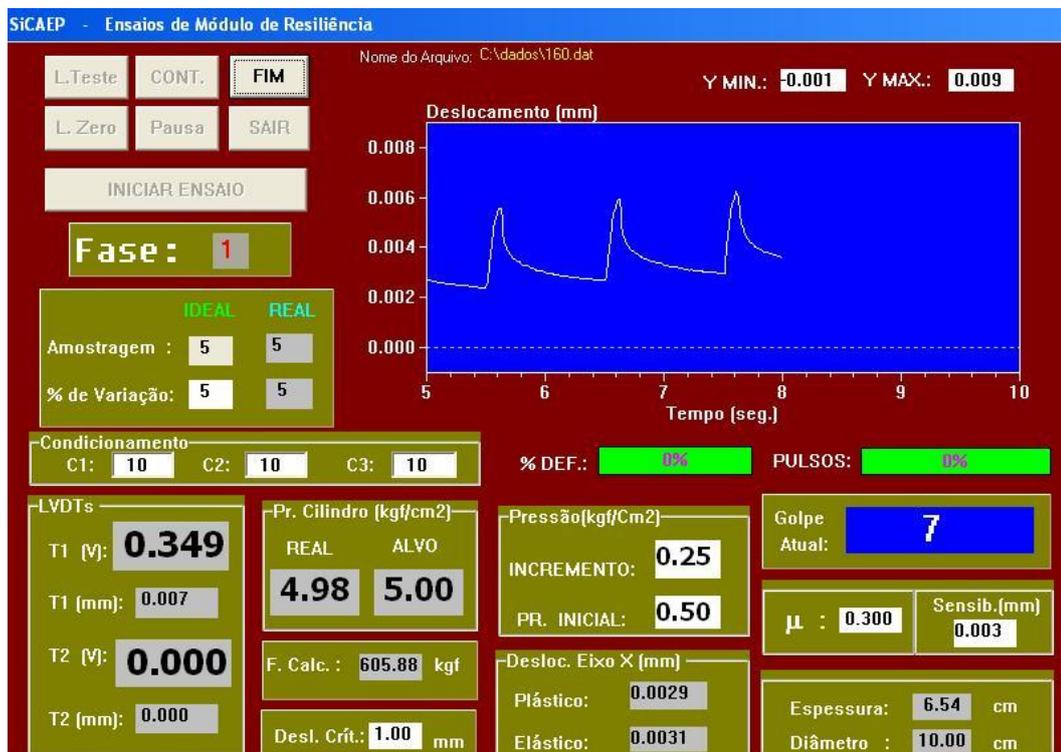


Figura 20– Tela com o andamento do ensaio de Módulo de Resiliência (Fonte: o autor)

Na Figura 21, encontra-se um resultado típico obtido para o ensaio de Módulo de Resiliência, no formato do relatório produzido pelo programa utilizado para a realização do ensaio.

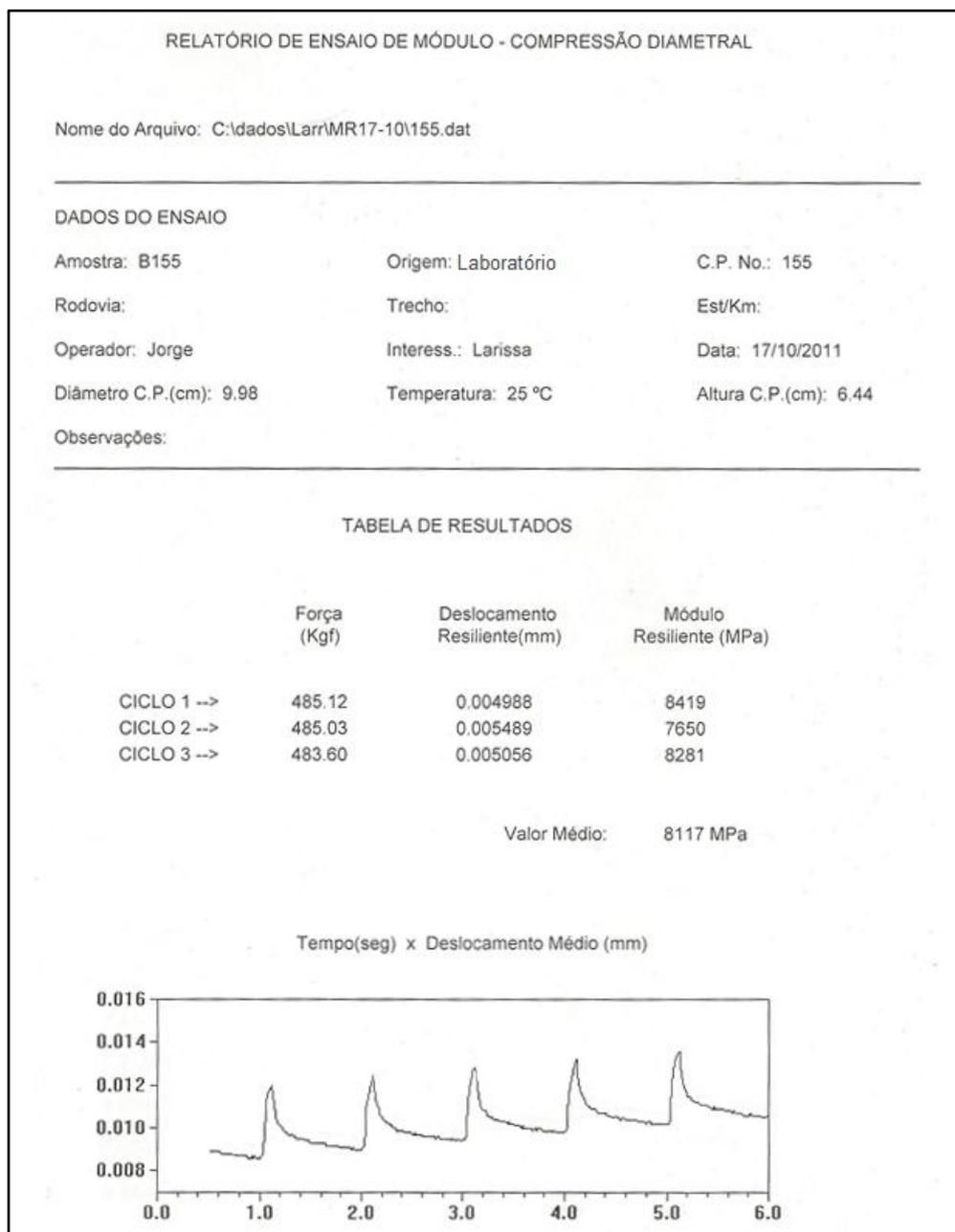


Figura 21– Relatório obtido com o ensaio de Módulo de Resiliência (Fonte: o autor)

### 2.4.2 Creep Estático

O Ensaio Uniaxial Estático, também conhecido como Creep Estático ou, ainda, simplesmente Creep, consiste no mais simples ensaio para estudar a deformação permanente de misturas.

Em materiais viscoelásticos, a função fluência –  $D(t)$  é bastante apropriada para analisar a relação tensão-deformação, sendo recíproca ao módulo em materiais elásticos (NASCIMENTO, 2008).

Neste ensaio, obtém-se a deformação total ao longo do tempo de carregamento, que pode ou não ser confinado. Podem-se determinar as componentes instantânea elástica (recuperável) e plástica (não-recuperável), que são independentes do tempo; e os parâmetros viscoelásticos, dependentes do tempo.

A câmara de temperatura deve ser ajustada para o valor de 40°C e os corpos de prova devem ser acondicionados em seu interior, até atingirem tal temperatura. Assim como demonstrado na Figura 22, as alças dos LVDTs devem ser afixadas no corpo de prova fazendo com que ele fique bem preso. Os parafusos devem ser apertados somente com a força dos dedos e são utilizados espaçadores para garantir que a distância entre os anéis seja igual em todos os pontos. Os LVDTs devem ser colocados no suporte adequado para ensaios de creep estático e, então, deve-se posicionar o corpo de prova embaixo do pistão de carga, como ilustrado na Figura 23 (GENELHU, 2009).



Figura 22– Montagem das alças dos LVDTs (GENELHU, 2009)

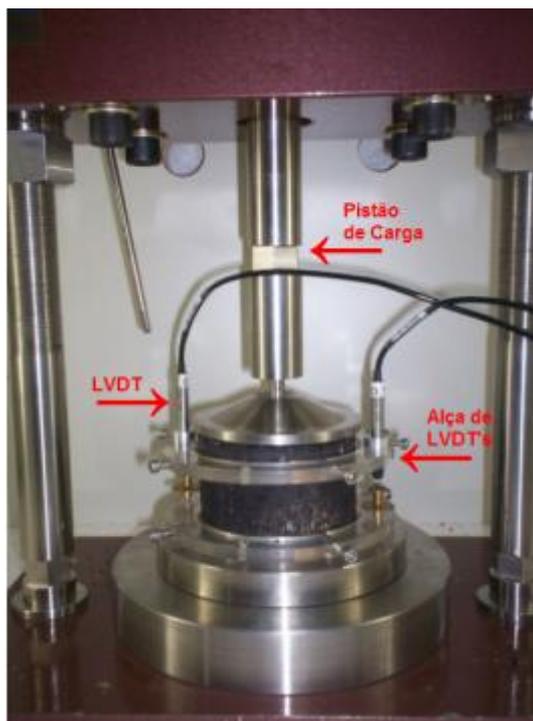


Figura 23– Esquema de montagem do ensaio creep estático (GENELHU, 2009)

Após a temperatura de equilíbrio ser atingida (aproximadamente duas horas), dá-se início ao ensaio de deformação permanente, após a inserção correta dos dados do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 24.

SiCAEP - CREEP - Dados do Ensaio

Nome do Arquivo: C:\dados\164.dat

Dados do Ensaio

Amostra: 164	Origem: Laboratório	C.P. Nº: 164
Rodovia:	Trecho:	Est / Km:
Operador: Romário	Interess.: Larissa	Data: 28/11/2011
Diâmetro do C.p. [cm]: 9.99	Temperatura.: 40 °C	Altura CP [cm]: 6.54
Observações:		Altura Ref.[cm]: 4.7

Constantes

Deslocamento [mm/V]	Tr. Pressão [(Kg/cm <sup>2</sup> )/V]
LVDT B1 : 0.108	Constante: 2.3704 [Kg/cm <sup>2</sup> ]/V
LVDT B2 : 0.1084	Valor Inicial: 1.086 Volts

Constantes p/ correção de pressão do pistão

P = F * (X) + (Y)	
Pr. [Carreg. Estático] 0.0082 [X]	-0.0023 [Y]
Pr. [Carreg. Dinâmico] 0.0082 [M]	0.0186 [N]
F = P * (Z) + (W)	
Força [Carr. Estático] 122.1800 [Z]	0.3706 [W]
Força [Carr. Dinâmico] 122.0300 [O]	-2.1717 [P]

Cilindro em Uso: **125**

Acesso K:

Cilindro 125mm  
 Cilindro 160mm

Continuar  
Retornar

Figura 24– Tela de entrada de dados para a realização do ensaio de creep estático

Com os LVDT's devidamente posicionados e ajustados, o ensaio tem início, com a aplicação de uma carga constante de 1,0 kgf/cm<sup>2</sup> durante os 3600 segundos iniciais e o descarregamento do corpo de prova durante os 900 segundos finais, totalizando um tempo total de ensaio de 4500 segundos. Na Figura 25, tem-se a tela com a realização do ensaio.



Figura 25– Tela com o andamento do ensaio de creep estático

Ao final do ensaio, o computador acoplado ao equipamento gera um relatório, que contém dois gráficos: um relaciona a deformação plástica específica máxima com o tempo e o outro relaciona a deformação plástica específica final com o tempo. O relatório obtido pelo equipamento utilizado para a realização do ensaio pode ser visto na Figura 26.

No relatório da figura 26 observa-se que os termos definidos como “Def. Plástica Máxima” e “Def. Plástica Final”, na realidade referem-se à “Deslocamento Plástico Máximo” e “Deslocamento Plástico Final”.

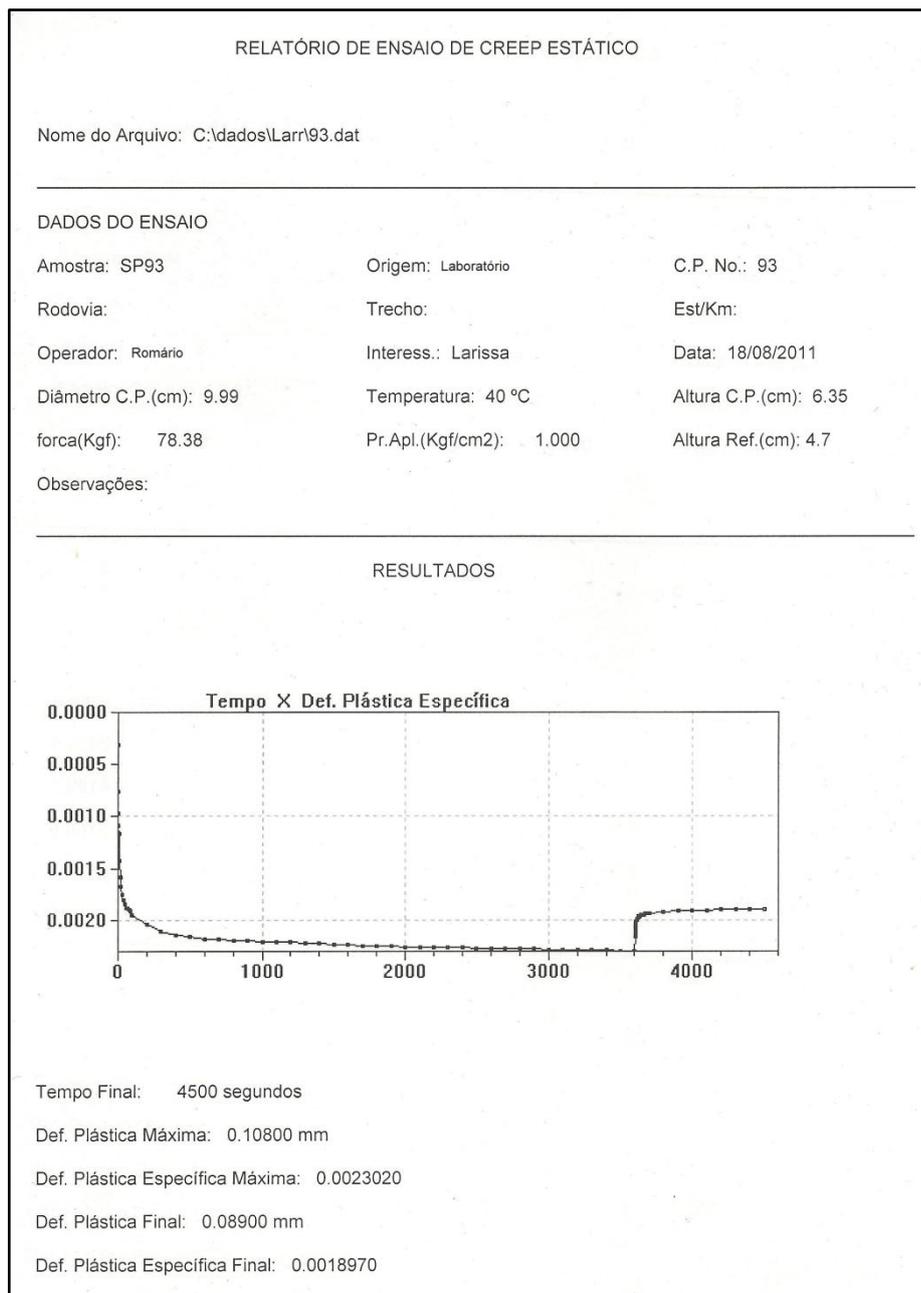


Figura 26– Relatório obtido com o ensaio de Creep Estático (Fonte: o autor)

### 2.4.3 Vida de Fadiga

As cargas dinâmicas oriundas do tráfego ao serem aplicadas no pavimento podem provocar danos intermitentes: crescentes na fase de carregamento e constantes no descarregamento. Esse tipo de carregamento produz falhas nos

materiais em valores mais baixos de tensão, pois a carga é aplicada diversas vezes (BERNUCCI et al., 2007).

A fadiga é definida pela ASTM E 206 – Standart Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures, como “o processo da mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões variáveis que produzem as fissuras que conduzem para totalizar a falha após um determinado número de ciclos” (ASTM, 1979).

Segundo Bernucci et al. (2007), a fadiga ocorre por meio de ações mecânicas e/ou térmicas, que isoladamente não parecem ser críticas, mas na verdade são decisivas para a vida útil do material.

Para realizar o ensaio, a temperatura da câmara deve ser ajustada para 25°C com os corpos de prova em seu interior, até atingir o equilíbrio. O corpo de prova deve ser colocado, de forma alinhada vertical e horizontalmente, entre os cutelos de aplicação de carga. O corpo de prova também deve estar centralizado com relação à haste do cilindro (Figura 27). O ensaio é realizado através do programa FADIGA1, fornecido pelo fabricante do equipamento.

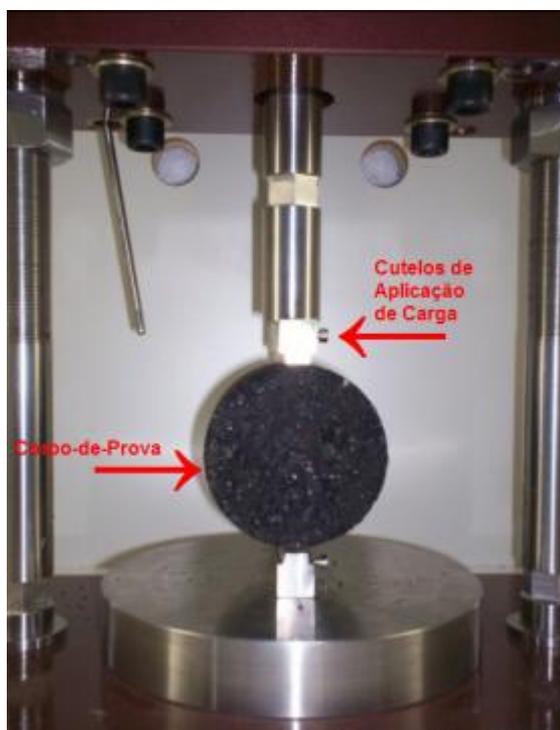


Figura 27– Montagem do ensaio de fadiga

O ensaio de Vida de Fadiga deve ser realizado após a realização do ensaio de Resistência à Tração, pois o valor encontrado neste ensaio é dado de entrada para a realização do ensaio de Vida de Fadiga. O ensaio é realizado, geralmente, com tensões que variam entre 40%, 35%, 30%, 25%, 20% e 15% da resistência à tração e a carga é aplicada em forma de pulsos, até a ruptura do corpo de prova.

As Figuras 28 e 29 mostram, respectivamente, a tela para a entrada de dados para a realização dos ensaios e o ensaio em andamento.

Misturas Betuminosas - Dados do Ensaio de Fadiga

Nome do Arquivo: C:\dados\178.dat

**Dados do Ensaio**

Amostra: B178      Origem: Laboratorio      C.P. Nº: 178

Rodovia: -      Trecho: -      Est / Km: -

Operador: Helio      Interess.: Larissa      Data: 07/11/2011

Diâmetro do C.p. (cm): 10.02      Temperatura: 25 °C      Altura do C.p. (cm): 6.55

Observações:

**Constantes**

Deslocamento (mm/V):  
 LVDT B1 : 0.108  
 LVDT B2 : 0.1084

Tr. Pressão [(Kg/cm<sup>2</sup>)/V]  
 Constante: 2.3704 [Kg/cm<sup>2</sup>/V]  
 Valor Inicial: 1.086 Volts

**Constantes p/ correção de pressão do pistão**

P = F * (X) + (Y)	
Pr. [Carreg. Estático]	0.0082 [X] -0.0023 [Y]
Pr. [Carreg. Dinâmico]	0.0082 [M] 0.0186 [N]

F = P * (Z) + (W)	
Força [Carr. Estático]	122.1800 [Z] 0.3706 [W]
Força [Carr. Dinâmico]	122.0300 [O] -2.1717 [P]

Cilindro em Uso: **125**

AcessoK

Cilindro 125mm  
 Cilindro 160mm

1 LVDT  
 2 LVDTs

Continuar

Retornar

Figura 28– Tela de entrada de dados para a realização do ensaio de Vida de Fadiga



Figura 29– Tela com o andamento do ensaio de Vida de Fadiga

Após a realização do ensaio, pode-se obter o relatório, que leva em consideração o Módulo de Resiliência médio da mistura e os resultados obtidos para os corpos de prova. O relatório contém dois gráficos: um que relaciona a diferença de tensões (que representa a diferença entre as tensões horizontais, de tração, e as tensões verticais, de compressão, no centro do corpo de prova) com o número de aplicações e o outro relaciona a deformação específica resiliente e o número de aplicações. Um exemplo do relatório obtido para o ensaio de Vida de Fadiga consta nas Figuras 30 e 31.

RELATÓRIO DE ENSAIO DE FADIGA							
Nome do Arquivo: C:\dados\Larr\FAD\B\188.dat							
<b>DADOS DO ENSAIO</b>							
Amostra: B188		Temperatura: 25 °C		Operador: helio			
Módulo resiliente médio: 10061 MPa		Interess.: larissa		Est/Km:			
Tensão de tração estática Máxima: 2.06 MPa		Rodovia:		Data: 07/11/2011			
Origem: laboratorio		Rodovia:		Trecho:			
Observações:							
TABELA DE RESULTADOS							
Num. C.P.	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	N.T. (%)	Força (Kgf)	D.E.R.	Dif.Tensões (MPa)	Número de Aplicações
183	6.49	9.99	40	855.72	0.0000819	3.300	371
184	6.47	9.98	35	745.70	0.0000717	2.880	248
185	6.51	10.00	30	644.41	0.0000614	2.470	842
186	6.41	9.98	25	527.70	0.0000512	2.060	1421
187	6.53	9.98	20	430.06	0.0000410	1.650	1353
188	6.55	9.99	15	323.86	0.0000307	1.240	4663
188	6.55	9.99	15	323.86	0.0000307	1.240	4663

Figura 30– Relatório obtido com o ensaio de Vida de Fadiga – Dados de todos os corpos de prova (Fonte: o autor)

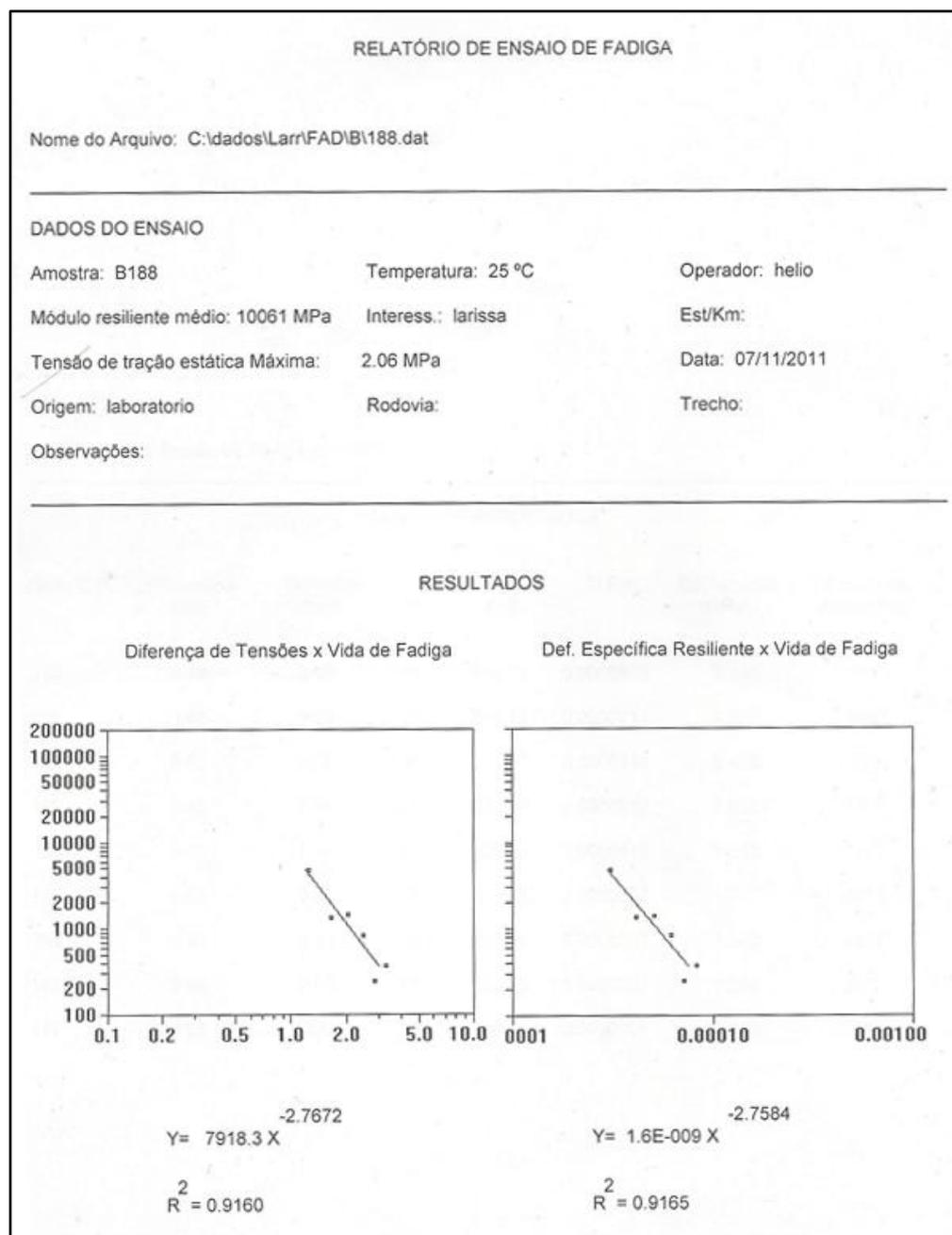


Figura 31– Relatório obtido com o ensaio de Vida de Fadiga – Curvas obtidas (Fonte: o autor)

#### 2.4.4 Considerações Finais sobre os Ensaios Mecânicos

Segundo Bernucci et al. (2007), as propriedades das misturas asfálticas dependem de diversos fatores como o meio em que estão aplicadas, há quanto tempo foram aplicadas e a frequência que são solicitadas pelos veículos. Levando-

se em conta essa diversidade, a caracterização dos materiais de pavimentação é uma tarefa complicada.

Somente a partir da década de 1970 é que se observa na utilização de métodos de dimensionamento de pavimentos a compatibilização entre as ações solicitantes do tráfego com a capacidade dos materiais. Os ensaios de laboratório para avaliação das propriedades mecânicas dos materiais procuram simular as condições reais de campo (MEDINA e MOTTA, 2005).

Desta forma, qualquer avaliação de materiais para fins de aplicação em pavimentos deve passar necessariamente pela execução de ensaios mecânicos de cargas repetidas.

Em todos os trabalhos recentes pesquisados sobre avaliação de misturas asfálticas, estudos de materiais para pavimentos, análise de desempenho de pavimentos, dentre outros estudos, são utilizados ensaios mecânicos de carga repetida (Módulo de Resiliência, Vida de Fadiga, Deformação Permanente).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com a finalidade de atestar ou não a viabilidade de emprego e as possíveis melhorias em misturas com o esqueleto mineral dosado de acordo com o Método Bailey, foi estabelecida uma programação de ensaios laboratoriais. Estes ensaios tiveram como objetivo comparar os efeitos da graduação dos agregados no desempenho de misturas asfálticas, por meio da comparação entre misturas obtidas pelo método de dosagem volumétrica tradicional e pelo Método Bailey para proporcionamento do esqueleto mineral.

A programação dos ensaios foi realizada da seguinte forma:

- Caracterização preliminar dos agregados utilizados na pesquisa, onde foram realizados ensaios usuais em determinação de misturas asfálticas, além de ensaios específicos utilizados pelo Método Bailey e pelo método de dosagem SUPERPAVE;
- Caracterização dos parâmetros de interesse do ligante asfáltico utilizado para a confecção das misturas asfálticas;
- Ensaios do processo de dosagem de misturas asfálticas (Método SUPERPAVE), com o objetivo de obter os teores de projeto para cada mistura de agregados;
- Ensaios mecânicos, para quantificar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas estudadas, destacando-se os ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração, vida de fadiga e deformação permanente.

O procedimento de dosagem abordado foi único: o procedimento SUPERPAVE, cuja principal diferença para o método tradicional (Marshall), encontra-se na forma de aplicação de energia. Enquanto a metodologia Marshall utiliza a compactação por impacto, a metodologia SUPERPAVE utiliza a compactação por amassamento.

O planejamento experimental contou com uma programação de ensaios, que buscou a determinação das causas que mais influenciaram o efeito de interesse desta pesquisa, ou seja, que leve à confirmação da melhoria de desempenho das misturas asfálticas dosadas utilizando o Método Bailey para proporcionamento dos agregados.

Visto que todos os ensaios são realizados sob condições preestabelecidas, faz-se necessário o uso de réplicas a fim de coletar observações das variáveis resposta nas várias condições experimentais consideradas no estudo. O número de réplicas (corpos de prova) foi definido para cada condição experimentada.

### 3.1 AGREGADOS

Os agregados utilizados para confecção das misturas foram provenientes de uma única fonte, oriundos de britagem e denominados comercial e usualmente de “Brita 1”, “Brita 0” e “Pó de Pedra” ou “Areia Industrial”. Os agregados pétreos foram fornecidos pela pedreira Pedra Sul, localizada na BR 040, próximo a Juiz de Fora. Na Figura 32, tem-se uma visão geral da pedreira onde foi obtido o material pétreo utilizado na pesquisa.



Figura 32– Visão geral da Pedreira Pedra Sul. (PEDRA SUL, 2011)

A coleta de amostras dos agregados se deu de acordo com a PRO 120/97, do DNER, seguindo-se as instruções para coleta em silos e na esteira. Para cada

material, foram coletados oito sacos com aproximadamente 60 kg cada por tipo de material. As Figuras 33, 34 e 35 mostram algumas etapas da coleta desse material e alguns detalhes da pedreira utilizada.



Figura 33– Pilhas de materiais



Figura 34– Britadores de Mandíbula, esteiras para o carregamento dos materiais e pilhas de materiais



Figura 35– Amostragem dos materiais em diferentes pilhas

Após chegarem ao laboratório, cada amostra (saco), foi reduzida de acordo com a NBR NM 27 (ABNT, 2001a), para a realização do ensaio de granulometria. O restante das amostras foi corretamente armazenado para a execução dos demais ensaios e para a confecção dos corpos de prova. A figura 36 ilustra o quarteamento das amostras para os ensaios.



Figura 36– Quarteamento de amostras de agregados para a realização de ensaios

### 3.1.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi feita de acordo com a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003) – Agregado – Determinação da Composição Granulométrica, onde foram utilizadas as peneiras exigidas pelas especificações do DNER e do procedimento SUPERPAVE.

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 5 e na Figura 37. Esses resultados representam as médias dos resultados obtidos.

Tabela 5– Análise Granulométrica dos Agregados

Peneiras (mm)	Materiais		
	Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra
25,0	100,00	100,00	100,00
19,0	78,61	100,00	100,00
12,5	16,81	99,76	100,00
9,5	2,60	76,25	100,00
4,8	1,67	11,72	99,00
2,0	1,55	2,54	60,66
0,42	1,43	2,20	31,61
0,18	1,13	1,84	15,97
0,075	0,55	1,10	6,68

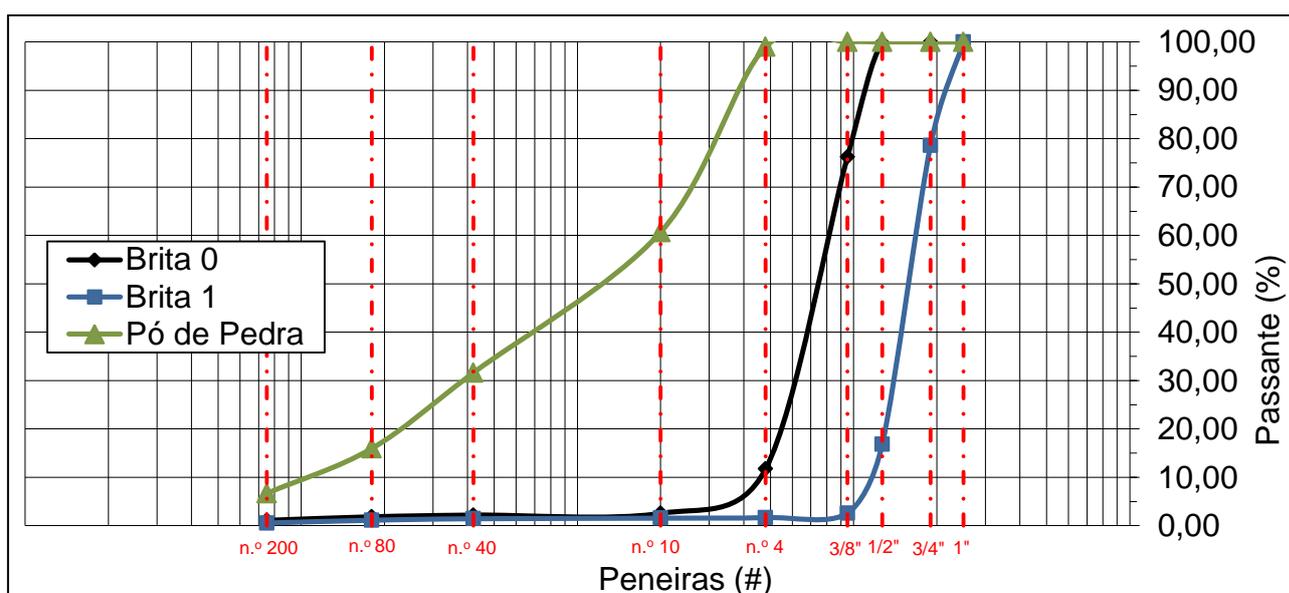


Figura 37– Composição Granulométrica dos Agregados

### 3.1.2 Caracterização dos Agregados

Os ensaios de caracterização foram realizados para todos os materiais (brita 0, brita 1 e pó de pedra) e os resultados encontram-se na Tabela 6. Além dos ensaios usuais para a caracterização dos agregados, foram realizados os ensaios exigidos pela metodologia SUPERPAVE e pelo Método Bailey.

No caso do método SUPERPAVE, foram realizados os seguintes ensaios: determinação da angulosidade de agregados miúdos (ASTM C 1252-06), mais conhecido como ensaio do funil, que possibilita a determinação do teor de vazios de agregados finos; determinação de partículas chatas e alongadas de agregados graúdos (ASTM D 4791-10), realizado com um paquímetro especial; equivalente de areia (DNER ME 054/1997b); abrasão Los Angeles (NBR NM 51/2001a); avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sódio ou magnésio (DNER ME 089/1994b).

Já para o Método Bailey, foram determinadas as massas específicas soltas e compactadas para o agregado graúdo e a massa específica compactada pelo agregado miúdo, através do procedimento descrito na AASHTO T19.

Foram realizados ainda os ensaios de massa específica real, massa específica aparente, absorção, adesividade do agregado graúdo (DNER ME 078/1994c), adesividade de agregados (DNER ME 079/1994d), índice de forma (DNER 086/1994e), índice de tenacidade Treton (DNER ME 399/1999).

Tabela 6– Caracterização dos Agregados

Características	Un.	Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra	Limites de Aceitação*
Massa Específica Real	g/cm <sup>3</sup>	2,711	2,730	2,714	–
Massa Específica Aparente	g/cm <sup>3</sup>	2,668	2,623	2,586	–
Absorção	%	0,597	1,497	1,326	–
Angulosidade de Agregados Finos	%	–	–	45,00	40-45
Partículas Chatas e Alongadas	%	2,8	8,7	1,2	10% (máx)
Equivalente de Areia	%	-	-	74	55 (mín)
Abrasão Los Angeles	%	27,8	29,5		40% (máx)
Adesividade do Agregado Graúdo		Satisf.	Satisf.	-	–
Adesividade de Agregados		8 (boa)	8 (boa)	8 (boa)	–
Durabilidade	%	2,74			12% (máx)
Massa Específica Solta	g/cm <sup>3</sup>	1,472	1,453	–	–
Massa Específica Compactada	g/cm <sup>3</sup>	1,621	1,582	1,893	–
Índice de Forma		0,63	0,55	–	–
Índice de Tenacidade Treton	%	87,85	–	–	

\*Os limites utilizados são referentes à metodologia SUPERPAVE

### 3.2 MATERIAL ASFÁLTICO

O material utilizado como Ligante Asfáltico nessa pesquisa é o CAP 50/70, fabricado pela REDUC (Refinaria Duque de Caxias – Rio de Janeiro), por ser o tipo mais usual em obras de pavimentação asfáltica da região de Juiz de Fora, devido à proximidade com tal refinaria. Os dados necessários à realização dessa pesquisa encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7– Caracterização do Ligante Asfáltico

Características	Un.	Valor encontrado
Densidade ( $d_{cap}$ )	-	1,049
Penetração	0,1 mm	53
Ponto de Amolecimento	°C	52
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	SSF	239
Viscosidade Saybolt Furol a 177°C	SSF	43

### 3.3 MISTURA DE AGREGADOS

Nesse trabalho estudou-se, inicialmente, uma mistura de agregados, buscando enquadrá-la na especificação do DNIT para concreto asfáltico (DNIT 031/06 – ES) e nas especificações SUPERPAVE.

Essa mistura inicial foi tomada como referência e passou a ser designada por mistura tradicional. O proporcionamento dos agregados foi feito utilizando-se o método tradicional das tentativas.

A partir desta mistura tradicional foram aplicadas as sugestões do Método Bailey para proporcionamento dos componentes e se obteve uma segunda mistura de agregados designada de Mistura Bailey.

Conforme recomendações do Método Bailey, foram executadas, a partir de modificações na mistura Bailey, mais duas misturas com o objetivo de verificar os efeitos dos agregados em misturas asfálticas: aumento de 5% da Massa Específica Escolhida e aumento de 0,2 na proporção AG.

Foram analisadas misturas com granulometria contínua, onde a distribuição das partículas é feita de maneira gradual, com porcentagem de partículas de todos os tamanhos. Como essas misturas apresentam desde um valor mínimo até um valor máximo, a mistura encontra-se bem distribuída.

As granulometrias foram escolhidas de forma a se enquadrarem nas especificações brasileiras e nas especificações SUPERPAVE e ASTM, cuja representação se dá em carta de potência de 0,45.

De acordo com as curvas granulométricas idealizadas a serem obtidas, as granulometrias estudadas foram preparadas por tamanho de partículas. As misturas foram confeccionadas peneira por peneira, onde a quantidade de material retido entre duas peneiras consecutivas é definida a partir da curva granulométrica em estudo.

As misturas abordadas neste estudo foram somente do tipo CA (Concreto Asfáltico). Com relação aos procedimentos de dosagem, trabalhou-se com o procedimento SUPERPAVE de misturas asfálticas com energia de 125 giros.

### 3.3.1 Mistura Tradicional

A mistura designada por Mistura Tradicional ao longo deste trabalho foi determinada de modo a atender às especificações do DNIT e SUPERPAVE. Buscou-se enquadrar a mistura na “faixa C” da especificação do DNIT, por ser a mais usual em concretos asfálticos utilizados na cidade de Juiz de Fora.

A determinação do proporcionamento de agregados foi feito pelo método de tentativas, em que, partindo-se das granulometrias médias representativas de cada material empregado, experimentaram-se proporções de cada componente até a obtenção da mistura desejada, ou seja, aquele que atenda à especificação seguida. Desta forma, chegou-se à composição encontrada na Tabela 8. Na Tabela 9 encontra-se a composição granulométrica e nas Figuras 38 e 39 encontram-se as curvas granulométricas da mistura tradicional representadas na forma tradicional e na carta de potência 0,45.

Como se pode observar na Figura 38, a curva não atende a especificação DNIT em sua parte superior (Peneira 19 mm). O objetivo dessa pesquisa não era o

de comparar misturas que se enquadrassem nas faixas preconizadas pelo DNIT, mas sim comparar misturas dosadas por um método tradicional e pelo método Bailey. Essa observação também é válida para as demais misturas estudadas neste trabalho.

Tabela 8– Composição de agregados da Mistura Tradicional

Agregado	Composição de agregados (%)
Brita 1	10,00
Brita 0	43,00
Pó de Pedra	47,00

Tabela 9– Composição granulométrica da Mistura Tradicional

Peneiras		Composição Granulométrica da Mistura Tradicional						
		Brita 1		Brita 0		Pó de Pedra		Curva de Projeto
mm	pol/nº	% Pass	10,0%	% Pass	43,0%	% Pass	47,0%	% Pass
38,1	1 1/2"	100,00	10,00					100,00
25,4	1"	100,00	10,00	100,00	43,00			100,00
19,05	3/4"	78,61	7,86	100,00	43,00			97,86
12,7	1/2"	16,81	1,68	99,76	42,90	100,00	47,00	91,58
9,5	3/8"	2,60	0,26	76,25	32,79	100,00	47,00	80,05
4,8	nº 4	1,67	0,17	11,72	5,04	99,00	46,53	51,74
2,0	nº 10	1,55	0,16	2,54	1,09	60,66	28,51	29,76
0,42	nº 40	1,43	0,14	2,20	0,95	31,61	14,86	15,95
0,18	nº 80	1,13	0,11	1,84	0,79	15,97	7,50	8,41
0,075	nº 200	0,55	0,05	1,10	0,47	6,68	3,14	3,67

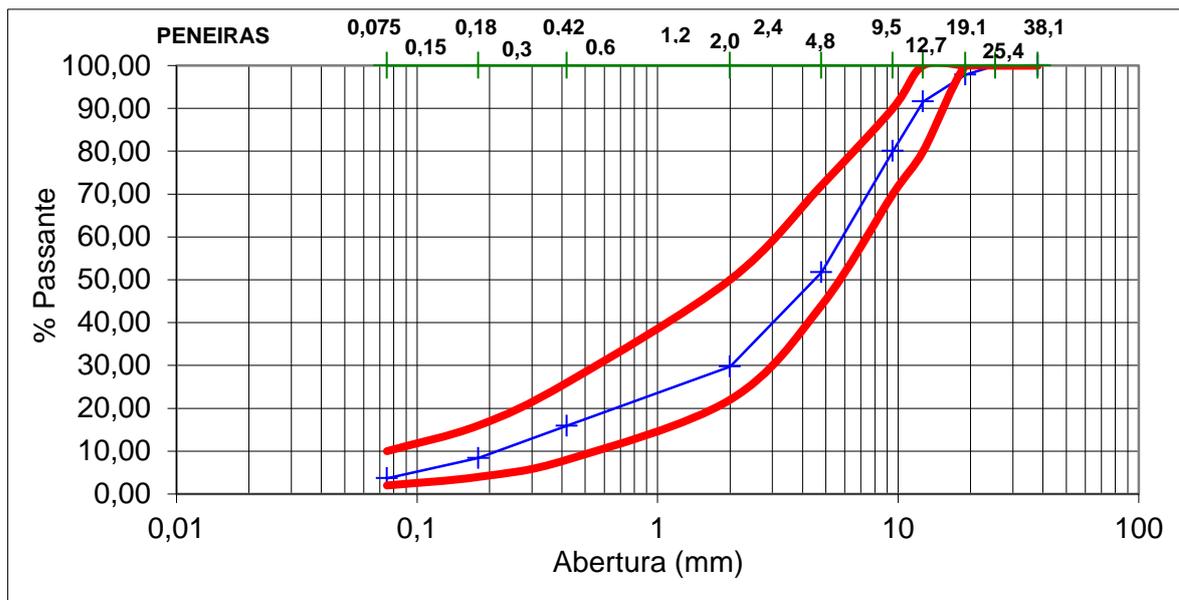


Figura 38– Representação da curva granulométrica da mistura tradicional em escala semilogarítmica

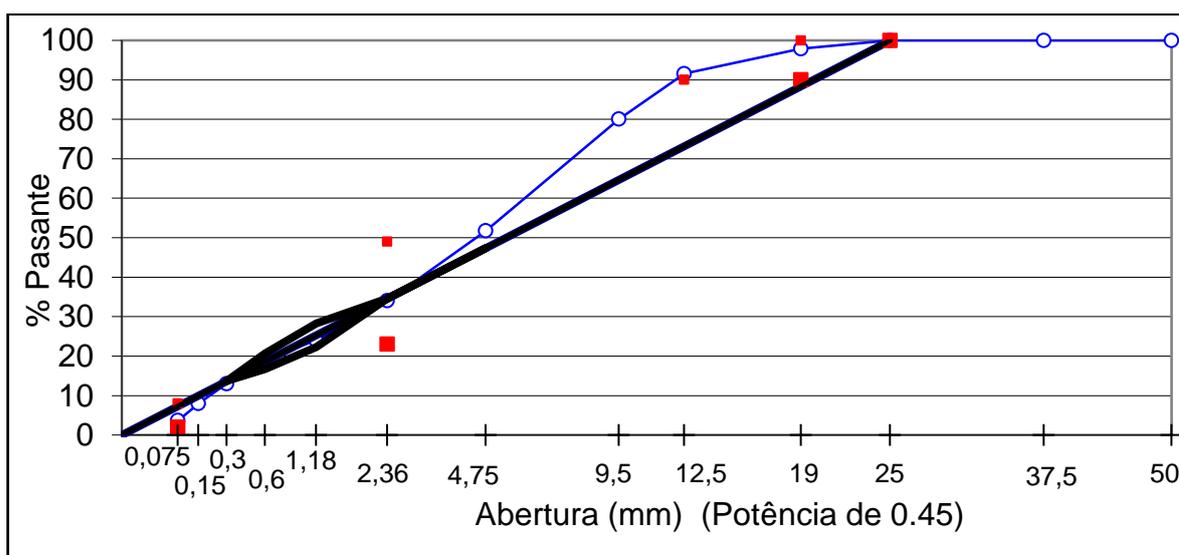


Figura 39– Representação da curva granulométrica da mistura tradicional em forma de carta na potência de 0,45

Com relação à metodologia SUPERPAVE, a Mistura Tradicional ficou enquadrada na especificação para o Tamanho Nominal Máximo de 19mm. Como se pode observar na Figura 39, na representação da curva na potência de 0,45, a mistura, apesar de passar pelos pontos de controle, corta a Zona Restrita (ZR).

Segundo Gouveia (2002), a zona de restrição é apenas uma recomendação para evitar alta proporção de areia fina natural, sendo que agregados que apresentem quantidades adequadas de partículas arredondadas e que satisfaçam o

VAM mínimo necessário, podem apresentar desempenho satisfatório ainda que passem pela zona de restrição. Em estudo realizado para a comparação dos resultados obtidos para o módulo de resiliência, Marques (2004) estudou uma mistura que passava pela zona restrita, sem prejuízos aos resultados obtidos.

### 3.3.2 Mistura Bailey

Partindo-se da Mistura Tradicional, buscou-se obter outra mistura que atendesse aos parâmetros e recomendações do Método Bailey. Nesta mistura foram alteradas as porcentagens dos materiais constituintes até se obter uma mistura que se enquadrasse nas recomendações do Método (Tabela 2.1).

Esta mistura, assim constituída foi designada por Mistura Bailey ao longo deste trabalho e também foi dosada de modo a atender a especificação do DNIT e também da especificação SUPERPAVE, buscando enquadrá-la na “faixa C” da especificação do DNIT.

Para determinar a composição granulométrica da mistura, inicialmente verificamos que a mistura obtida anteriormente (Mistura Tradicional) não se enquadrava nos parâmetros obtidos no Método Bailey, e como não foram satisfeitas todas as recomendações da Tabela 2.1, foi definida a primeira alteração das proporções dos agregados, chegando à composição de agregados apresentada na Tabela 10.

Na Tabela 11 encontra-se a composição granulométrica e nas Figuras 40 e 41 encontram-se as curvas granulométricas da mistura Bailey representadas na forma tradicional e na carta de potência 0,45.

Tabela 10– Composição de agregados da Mistura Bailey

Agregado	Composição de agregados (%)
Brita 1	21,10
Brita 0	29,00
Pó de Pedra	49,90

Tabela 11– Composição granulométrica da Mistura Bailey

Peneiras		Composição Granulométrica da Mistura Bailey						
		Brita 1		Brita 0		Pó de Pedra		Curva de Projeto
mm	pol/n°	% Pass	21,1%	% Pass	29,0%	% Pass	49,9%	% Pass
38,1	1 1/2"	100,00	21,10					100,00
25,4	1"	100,00	21,10	100,00	29,00			100,00
19,05	3/4"	78,61	16,59	100,00	29,00			95,49
12,7	1/2"	16,81	3,55	99,76	28,93	100,00	49,90	82,38
9,5	3/8"	2,60	0,55	76,25	22,11	100,00	49,90	72,56
4,8	n° 4	1,67	0,35	11,72	3,40	99,00	49,40	53,15
2,0	n° 10	1,55	0,33	2,54	0,74	60,66	30,27	31,33
0,42	n° 40	1,43	0,30	2,20	0,64	31,61	15,78	16,71
0,18	n° 80	1,13	0,24	1,84	0,53	15,97	7,97	8,74
0,075	n° 200	0,55	0,12	1,10	0,32	6,68	3,33	3,77

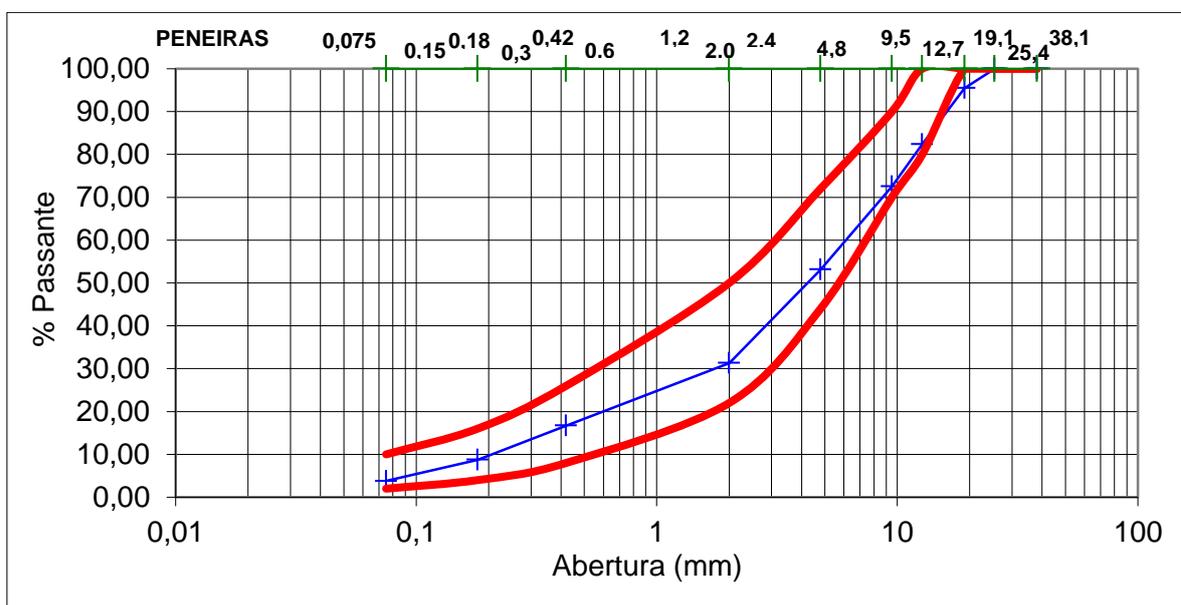


Figura 40– Representação da curva granulométrica da mistura Bailey em escala semilogarítmica

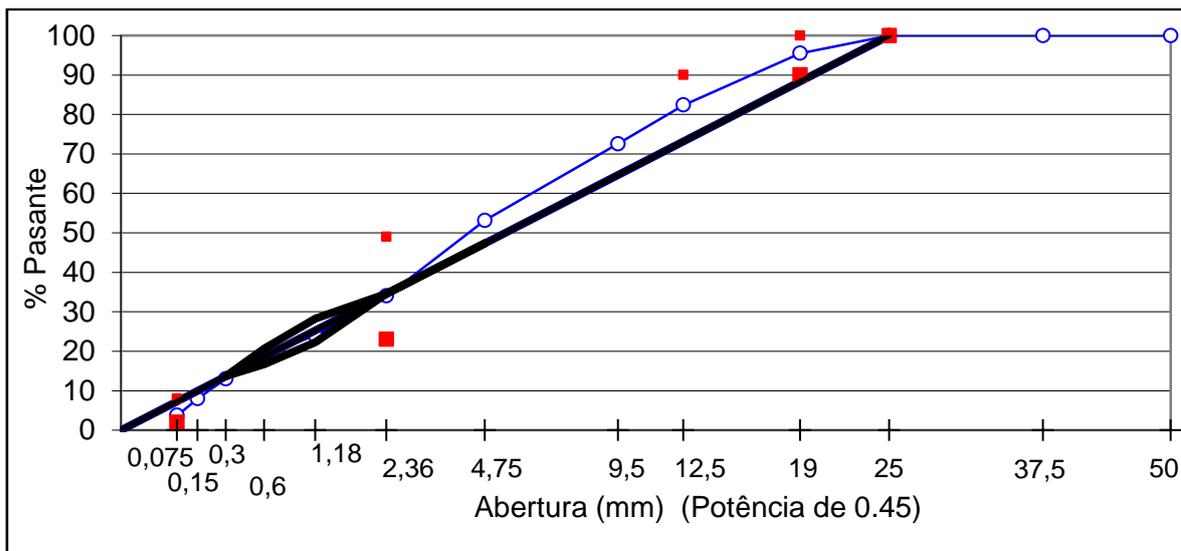


Figura 41– Representação da curva granulométrica da mistura Bailey em forma de carta na potência de 0,45

Com relação à metodologia SUPERPAVE, a Mistura Bailey ficou enquadrada na especificação para o Tamanho Nominal Máximo de 19mm. Como se pode observar na Figura 41, na representação da curva na potência de 0,45, a mistura, apesar de passar pelos pontos de controle, também corta a Zona Restrita (ZR).

### 3.3.3 Mistura Bailey com Alteração na Massa Específica Escolhida

Conforme descrito no item 3.3, a partir da Mistura Bailey foi elaborada uma mistura com acréscimo de 5% na Massa Específica Escolhida. Essa nova mistura será, ao longo deste trabalho, chamada de Mistura Bailey MEE + 5%, sendo dosada para atender os mesmos pré-requisitos das anteriores.

Para determinar a composição granulométrica da mistura, modificou-se a Massa Específica Escolhida da Mistura Bailey de 98% para 103%. Na Tabela 12 encontra-se a composição de agregados da mistura Bailey MEE + 5%, na Tabela 13, a distribuição granulométrica e nas Figuras 42 e 43 encontram-se as curvas granulométricas representadas na forma tradicional e na carta de potência 0,45.

Tabela 12– Composição de agregados da Mistura Bailey MEE + 5%

Agregado	Composição de agregados (%)
Brita 1	21,50
Brita 0	32,00
Pó de Pedra	46,50

Tabela 13– Composição granulométrica da Mistura Bailey MEE + 5%

Peneiras		Composição Granulométrica da Mistura Bailey MEE + 5%						
		Brita 1		Brita 0		Pó de Pedra		Curva de Projeto
mm	pol/nº	% Pass	21,5%	% Pass	32,0%	% Pass	46,5%	% Pass
38,1	1 1/2"	100,00	21,50					100,00
25,4	1"	100,00	21,50	100,00	32,00			100,00
19,05	3/4"	78,61	16,90	100,00	32,00			95,40
12,7	1/2"	16,81	3,61	99,76	31,92	100,00	46,50	82,04
9,5	3/8"	2,60	0,56	76,25	24,40	100,00	46,50	71,46
4,8	nº 4	1,67	0,36	11,72	3,75	99,00	46,03	50,14
2,0	nº 10	1,55	0,33	2,54	0,81	60,66	28,21	29,35
0,42	nº 40	1,43	0,31	2,20	0,70	31,61	14,70	15,71
0,18	nº 80	1,13	0,24	1,84	0,59	15,97	7,42	8,26
0,075	nº 200	0,55	0,12	1,10	0,35	6,68	3,11	3,58

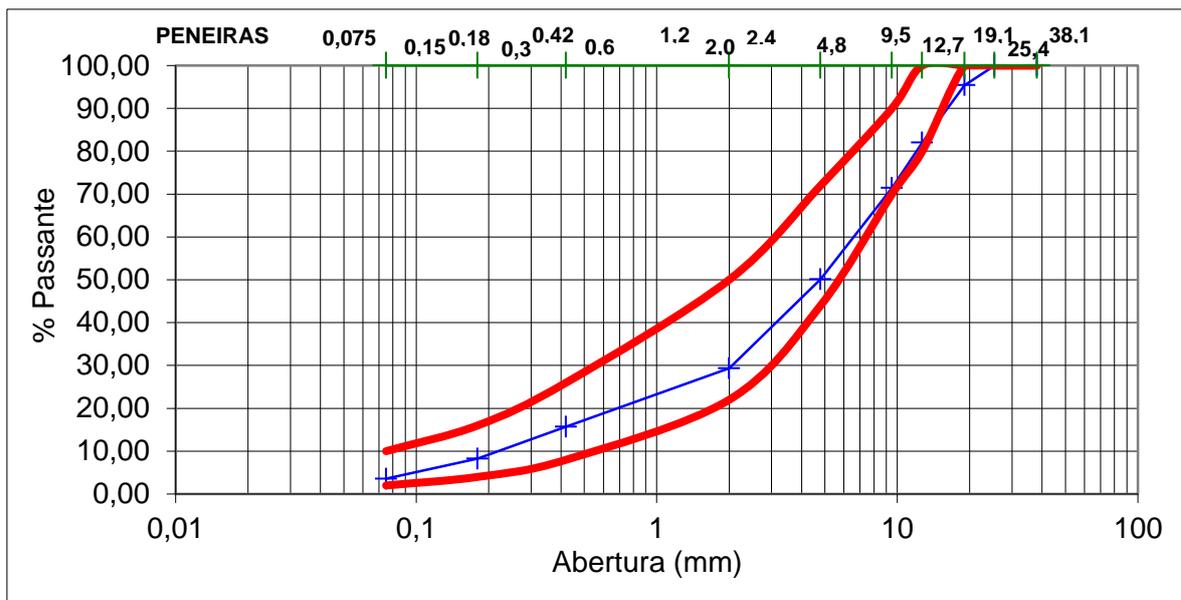


Figura 42– Representação da curva granulométrica da mistura Bailey MEE + 5% em escala semilogarítmica

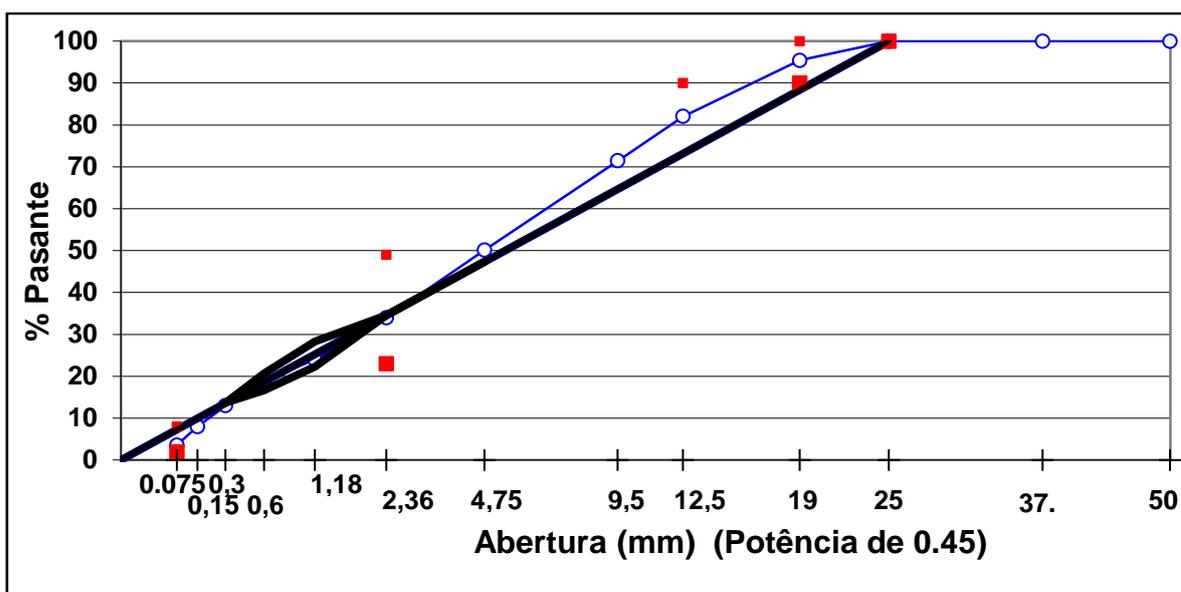


Figura 43– Representação da curva granulométrica da mistura Bailey MEE + 5% em forma de carta na potência de 0,45

A Mistura Bailey MEE + 5% também se enquadrou na especificação SUPERPAVE para o Tamanho Nominal Máximo de 19mm. Na Figura 43, na representação da curva na potência de 0,45, a mistura, apesar de passar pelos pontos de controle, também corta a Zona Restrita (ZR).

### 3.3.4 Mistura Bailey com Alteração na Proporção de Agregados Graúdo

Conforme descrito no item 3.3, apartir da Mistura Bailey foi elaborada outra mistura, esta com acréscimo de 0,2 na Proporção de Agregados Graúdos, que passou de 0,71 para 0,73, dosada da mesma maneira que as demais e será chamada de Mistura Bailey AG + 0,2.

A determinação da composição granulométrica se deu através de pequenas alterações nas porcentagens de agregados até que a alteração da Proporção AG fosse 0,2 maior que a Mistura Bailey, cujo resultado se encontra na Tabela 14. A composição granulométrica da mistura Bailey AG + 0,2 encontra-se na Tabela 15 e sua representação gráfica encontra-se nas Figuras 44 e 45.

Tabela 14– Composição de agregados da Mistura Bailey AG + 0,2

Agregado	Composição de agregados (%)
Brita 1	20,6
Brita 0	29,5
Pó de Pedra	49,9

Tabela 15– Composição granulométrica da Mistura Bailey AG + 0,2

Peneiras		Composição Granulométrica da Mistura BaileyAG + 0,2						
		Brita 1		Brita 0		Pó de Pedra		Curva de Projeto
mm	pol/nº	% Pass	20,6%	% Pass	29,5%	% Pass	49,9%	% Pass
38,1	1 1/2"	100,00	20,60					100,00
25,4	1"	100,00	20,60	100,00	29,50			100,00
19,05	3/4"	78,61	16,19	100,00	29,50			95,59
12,7	1/2"	16,81	3,46	99,76	29,43	100,00	49,90	82,79
9,5	3/8"	2,60	0,54	76,25	22,49	100,00	49,90	72,93
4,8	nº 4	1,67	0,34	11,72	3,46	99,00	49,40	53,20
2,0	nº 10	1,55	0,32	2,54	0,75	60,66	30,27	31,34
0,42	nº 40	1,43	0,29	2,20	0,65	31,61	15,78	16,72
0,18	nº 80	1,13	0,23	1,84	0,54	15,97	7,97	8,74
0,075	nº 200	0,55	0,11	1,10	0,32	6,68	3,33	3,77

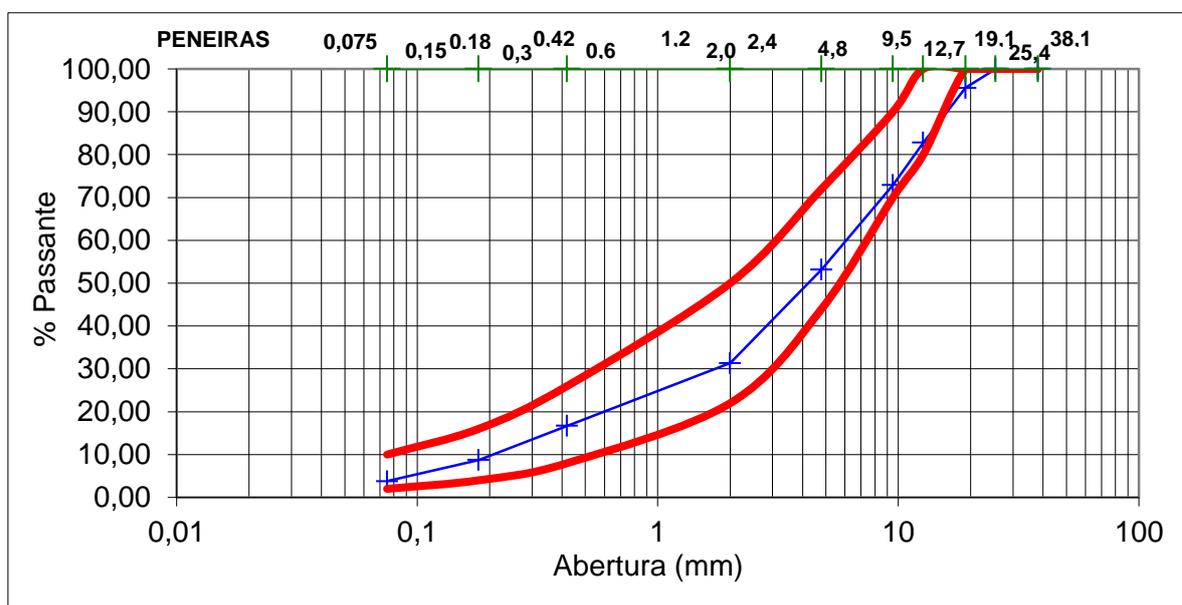


Figura 44– Representação da curva granulométrica da mistura Bailey AG + 0,2 em escala semilogarítmica

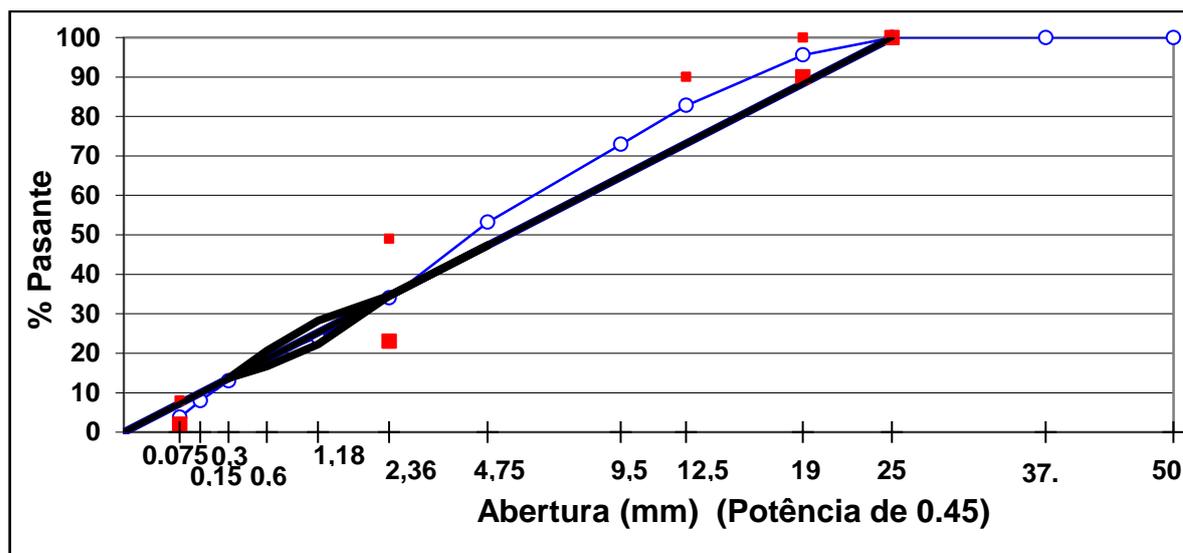


Figura 45– Representação da curva granulométrica da mistura Bailey AG + 0,2 em forma de carta na potência de 0,45

### 3.3.5 Curvas Granulométricas Obtidas

Com o objetivo de representar graficamente e de ficar visualmente mais claro, todas as misturas estudadas estão apresentadas nas Tabelas 16 e 17 e na Figura 46, na forma de escala semilogarítmica. Como podemos observar na Figura 46, as misturas Bailey e Bailey AG + 0,2 são muito parecidas e chegam a se confundir nessa representação.

Tabela 16– Composição de agregados das misturas estudadas

Agregado	Composição de agregados (%)			
	Tradicional	Bailey	Bailey MEE + 5%	Bailey AG + 0,2
Brita 1	10,0	21,1	21,5	20,6
Brita 0	43,0	29,0	32,0	29,5
Pó de Pedra	47,0	49,9	46,5	49,9

Tabela 17– Composição granulométrica das misturas estudadas

Peneiras		Composição Granulométrica das Misturas Estudadas			
		Tradicional	Bailey	Bailey MEE + 5%	Bailey AG + 0,2
mm	pol/n°	% Passante			
38,1	1 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00
25,4	1"	100,00	100,00	100,00	100,00
19,05	3/4"	97,86	95,49	95,40	95,59
12,7	1/2"	91,58	82,38	82,04	82,79
9,5	3/8"	80,05	72,56	71,46	72,93
4,8	n° 4	51,74	53,15	50,14	53,20
2,0	n° 10	29,76	31,33	29,35	31,34
0,42	n° 40	15,95	16,71	15,71	16,72
0,18	n° 80	8,41	8,74	8,26	8,74
0,075	n° 200	3,67	3,77	3,58	3,77

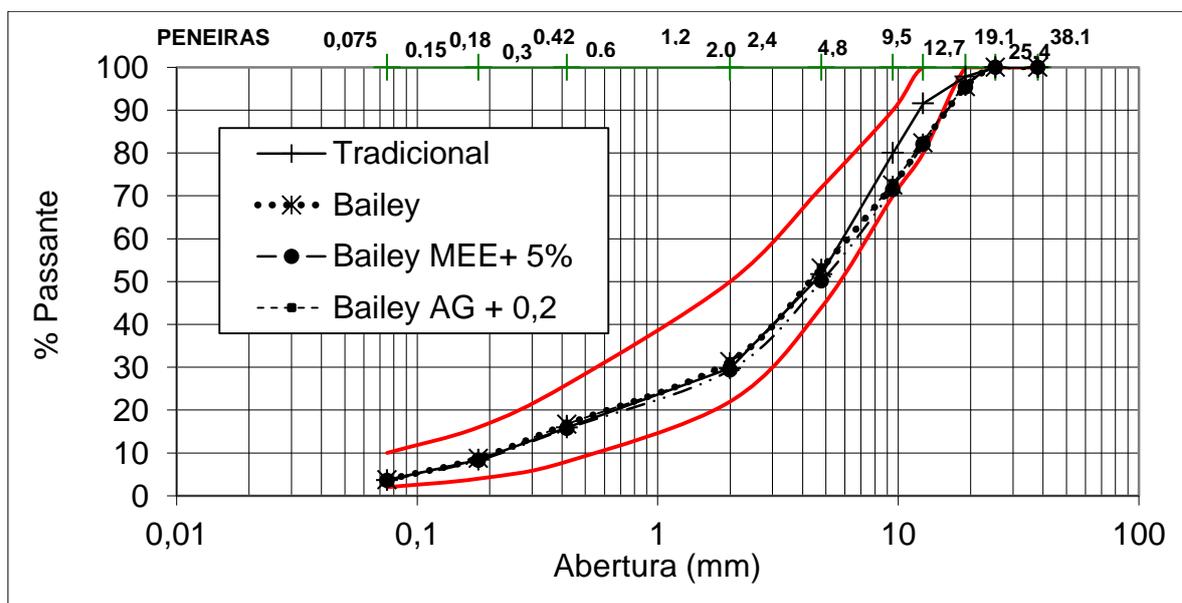


Figura 46– Representação das curvas granulométricas das misturas estudadas em escala semilogarítmica

### 3.3.6 Parâmetros Granulométricos do Método Bailey

Os parâmetros granulométricos obtidos pelo Método Bailey das misturas utilizadas neste estudo e descritas nos itens 3.3.2 a 3.3.4 encontram-se resumidos na Tabela 18. Como se pode observar, as misturas Tradicional, Bailey, Bailey MEE + 5% e Bailey AG + 0,2 apresentaram proporção de finos do agregado fino superior ao valor desejável. Isto se deve à presença de finos em todos os agregados, inclusive nos grãos, que não foram descartados no momento da determinação e nem na elaboração das misturas.

Tabela 18– Parâmetros granulométricos das misturas utilizadas

Parâmetro	Mistura				
	Desejável	Tradicional	Bailey	Bailey MEE + 5%	Bailey AG + 0,2
Massa Específica Escolhida	95% – 105%	–	98%	103%	98%
Proporção AG	0,60 – 0,75	1,42	0,71	0,75	0,73
Proporção GAF	0,35 – 0,50	0,48	0,49	0,49	0,49
Proporção FAF	0,35 – 0,50	0,52	0,52	0,52	0,52

Ao observar a Tabela 18, constata-se que a mistura Tradicional não se adequava aos parâmetros granulométricos do Método Bailey, principalmente no que diz respeito à proporção de agregados grãos.

### 3.4 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para a elaboração dos corpos de prova seguiram-se os procedimentos adotados usualmente no Laboratório de Pavimentação da UFJF, onde inicialmente são preparadas as misturas de agregados, e posteriormente acrescidas ao ligante asfáltico no teor de projeto e compactadas no compactador giratório.

### 3.4.1 Mistura de Agregados

Para a elaboração de todas as misturas de agregados, o material armazenado restante dos ensaios de caracterização foi peneirado e separado de acordo com o conjunto de dez peneiras utilizadas pelo Método Bailey.

A mistura de agregados foi elaborada de forma que os corpos de prova resultantes tivessem aproximadamente 100 mm de diâmetro e aproximadamente 63 mm de altura, além de uma massa aproximada de 1200 g.

Os corpos de prova foram montados pesando-se cumulativamente a quantidade de agregados necessária para a granulometria em questão. A mistura de agregados resultante foi devidamente armazenada em sacos plásticos até o início do processo de mistura com o ligante.

### 3.4.2 Dosagem das misturas

Os teores de ligante para cada mistura foram determinados de acordo com os procedimentos SUPERPAVE, onde se estima o teor inicial em peso conforme descrito por MOTTA et al (1996).

A partir dos teores iniciais, foram elaboradas misturas com quatro teores diferentes: uma com o teor aproximadamente igual ao teor estimado inicial, uma com 0,5% a menos que o teor estimado, uma com 0,5% a mais que o teor estimado e por último uma com 1,0% a mais que o teor estimado. Essas misturas foram realizadas para a determinação do teor de projeto.

Com a mistura de agregados e os teores iniciais, partiu-se para a execução das misturas, onde a temperatura dos materiais no momento da mistura foi adotada de acordo com as especificações para Concreto Asfáltico do DNIT (DNIT, 2006), em função da curva Viscosidade x Temperatura.

Os materiais foram acondicionados até o equilíbrio de temperatura em três estufas diferentes: uma para os agregados, uma para o ligante asfáltico e uma terceira para colocar a mistura, onde ficava durante 2 horas antes da compactação.

#### a) Compactação das Misturas

Após o envelhecimento de duas horas, as misturas foram compactadas no Compactador Giratório. O molde utilizado para a compactação foi colocado na estufa junto às misturas, para que sua temperatura se igualasse a delas.

As misturas eram colocadas no molde, com a utilização de papel filtro na base do molde e outro por cima da mistura. Após o molde com a mistura ser colocado no lugar correto do compactador giratório, a compactação se dá de forma praticamente automatizada, através de um software fornecido pelo próprio fabricante.

Ao final dos 125 giros, o equipamento para de girar e o corpo de prova pode ser retirado, através do extrator presente no compactador giratório, pelo operador. O corpo de prova deve ser deixado em repouso por algum tempo, afim de que não se desfaça. Após o resfriamento, os ensaios podem ser realizados.

#### b) Definição dos teores de projeto

Para a definição dos teores de projeto de cada mistura foram utilizados 3 corpos de prova para cada teor perfazendo um total de 12 corpos de prova (4 teores x 3 corpos de prova). Todos os teores de projeto foram definidos usando a metodologia SUPERPAVE.

Na Tabela 19 pode ser visto o resultado final dos teores de projeto das dosagens para cada mistura. Os teores apresentados foram obtidos para uma condição de vazios de 4%, conforme recomenda a metodologia SUPERPAVE.

Tabela 19– Teor de projeto das misturas estudadas

Misturas	Teor de Projeto
Tradicional	5,14%
Bailey	4,22%
Bailey MEE + 5%	4,66%
Bailey AG + 0,2	4,66%

Após a definição dos teores de projeto para cada uma das quatro misturas estudadas, passou-se à confecção dos corpos de prova a serem utilizados nos ensaios mecânicos.

Desta forma, foram compactados 21 corpos de prova no teor de projeto para cada mistura, sendo produzidos da seguinte maneira: 6 corpos de prova para ensaio de Resistência à Tração, 6 corpos de prova para ensaio de Módulo de Resiliência, 6 corpos de prova para Vida de Fadiga e 3 corpos para Deformação Permanente (Creep Estático), além de 3 corpos de prova reserva no caso da mistura Bailey AG + 0,2.

Sendo assim, foram realizados, para cada mistura, 12 corpos de prova para a determinação dos teores de projeto e outros 21 moldados no teor de projeto. Como foram realizadas quatro misturas, totalizaram-se 132 corpos de prova confeccionados.

Na metodologia SUPERPAVE, o valor da Massa Específica Real da mistura é obtido segundo o ensaio prescrito na ASTM D 3041, diferentemente da Metodologia Marshall que utiliza a Densidade Máxima Teórica (DMT).

Para a realização do ensaio são utilizados os seguintes acessórios e equipamentos:

- Recipientes para aplicação de vácuo do tipo Kitazato;
- Bomba de Vácuo capaz de evacuar o ar do recipiente;
- Manômetro para medição da pressão residual;
- Agitador mecânico do tipo Mesa Vibratória.

O equipamento utilizado para a realização dos ensaios de determinação da Densidade Máxima Medida encontra-se no Laboratório de Pavimentação da UFJF e pode ser visto na Figura 47.



Figura 47– Equipamento utilizado para a determinação da DMM

Para a realização do ensaio, seguem-se os seguintes procedimentos:

- Preparação da amostra: mistura de agregados e ligantes de acordo com a granulometria estipulada, teor estabelecido e temperaturas determinadas;
- A mistura preparada deve ter suas partículas separadas manualmente, evitando a quebra das partículas. Após a separação das partículas, a mistura deve ser deixada à temperatura ambiente para que esfrie. Ao atingir o equilíbrio, a mistura deve ser colocada no Kitazato, pesando a massa da amostra seca (esta massa deve ser designada por A);
- Após a pesagem ao ar da amostra, deve ser colocada água a uma temperatura aproximada de 25°C, cobrindo a amostra completamente;
- O recipiente deve ser colocado sobre a mesa vibratória e conectado ao sistema com a bomba de vácuo. O agitador e a bomba de vácuo devem ser ligados, aumentando a pressão de vácuo até cerca de  $3,7 \pm 0,3$  kPa ( $27,5 \pm 2,5$  mm de Hg). Após ser atingida, a pressão deve ser mantida por cerca de 15 minutos, seguindo o programa estipulado na mesa vibratória;
- Após a aplicação de vácuo terminar, a pressão deve ser aliviada através da abertura da válvula de sangria;

- Preencher o kitazato com água, tomando cuidado para não introduzir ar na amostra; enxugar qualquer umidade no exterior do frasco e pesá-lo, designando por E a massa do frasco, da água e da amostra.

A Equação 10 contém a expressão utilizada para a determinação da Densidade Máxima Medida.

$$DMM = \frac{A}{A + D - E} \quad (10)$$

Onde:

DMM = Densidade Máxima Medida;

A = Massa da amostra seca ao ar (g);

D = Massa do frasco preenchido com água a 25° C (g);

E = Massa do frasco com amostra preenchida com água a 25° C (g).

Para a determinação dos parâmetros volumétricos das misturas estudadas, os corpos de prova devem ter suas alturas (H) e diâmetros (D) determinados, além da determinação do Massa Seca (Ms), determinação do Massa Imersa (Mi) através de pesagem hidrostática e determinação do Massa Úmida (Mh) após a secagem superficial do corpo de prova após a retirada do corpo de prova da imersão.

Com os valores das massas obtidas, determina-se, através da Equação 11, o valor da densidade aparente de cada mistura.

$$Dap = \frac{Ms}{Mh - Mi} \quad (11)$$

Onde:

Dap = Densidade Aparente da Mistura;

Ms = Massa seca do corpo de prova;

Mh = Massa úmida do corpo de prova;

Mi = Massa imersa do corpo de prova.

Com os valores da densidade aparente e da densidade máxima medida (DMM), calculou-se, o Volume de Vazios de todos os corpos de prova, conforme a Equação 12.

$$Vv = \frac{DMM - Dap}{DMM} \times 100 \quad (12)$$

Onde:

Vv = Volume de Vazios;

Dap = Densidade Aparente da Mistura;

DMM = Densidade Máxima Medida.

A determinação dos Vazios no Agregado Mineral (VAM) foi realizada de acordo com a Equação 13.

$$VAM = Vv + \frac{Dap \times t}{d_b} \times 100 \quad (13)$$

Onde:

VAM = Vazios no Agregado Mineral;

Vv = Volume de Vazios;

Dap = Densidade Aparente da Mistura;

t = Teor de Projeto;

d<sub>b</sub> = Densidade Específica do Asfalto.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios para a determinação dos parâmetros volumétricos e dos parâmetros mecânicos e de compactação das misturas estudadas. Os resultados aqui apresentados correspondem às médias dos corpos de prova, os valores para todos os corpos de prova encontram-se nos Anexos A e B, ao final desse trabalho.

Os parâmetros volumétricos foram obtidos logo após a moldagem dos corpos de prova no teor de projeto e compreenderam as seguintes determinações: altura, diâmetro, massa seca, massa imersa e massa úmida. Com a determinação dessas dimensões foram obtidos os seguintes parâmetros das misturas: densidade aparente ( $D_{ap}$ ), volume de vazios ( $V_v$ ), vazios no agregado mineral (VAM) e relação betume vazios (RBV).

Com os parâmetros volumétricos determinados, partiu-se para os ensaios mecânicos, que foram também realizados no laboratório de pavimentação da UFJF. Nessa pesquisa foram realizados os ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência, vida de fadiga e creep estático.

Ainda serão mostrados os resultados da análise da compactação giratória através dos parâmetros CDI e TDI.

### 4.1 PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS

A determinação dos parâmetros volumétricos foi feita logo após a moldagem dos corpos de prova e antes da realização dos parâmetros mecânicos. Em todos eles foram determinados a altura ( $H$ ) e o diâmetro dos corpos de prova ( $D$ ).

Após essa determinação, os corpos de prova foram pesados para a definição da densidade aparente das misturas, obedecendo a seguinte sequência: determinação da Massa Seca ( $M_s$ ), determinação Massa Imersa ( $M_i$ ) através de pesagem hidrostática e determinação do Massa Úmida ( $M_h$ ) após a secagem superficial do corpo de prova após a retirada do corpo de prova da imersão.

Na Tabela 20 encontra-se o resumo dos resultados obtidos para as misturas elaboradas. Os resultados apresentados representam as médias dos valores obtidos

para cada mistura, moldados no teor de projeto. Os resultados para todos os corpos de prova encontram-se no Anexo A.

Tabela 20– Parâmetros Volumétricos das misturas estudadas

Parâmetro	Mistura			
	Tradicional	Bailey	Bailey MEE + 5%	Bailey AG + 0,02
Densidade Aparente – Dap	2,417	2,383	2,418	2,407
Densidade Máxima Medida – DMM	2,524	2,528	2,540	2,512
Vazios – Vv (%)	4,26	5,34	4,86	4,23
Vazios no Agregado Mineral – VAM (%)	16,10	15,32	15,56	14,86
Relação Betume Vazios – RBV (%)	73,46	62,95	69,49	71,76

Os parâmetros volumétricos das misturas cujo esqueleto foi dosado pelo Método Bailey atenderam às faixas especificadas pela metodologia SUPERPAVE com melhor enquadramento para o VAM e o RBV, que apresentam menores valores, conforme recomendam Vavrik et al (2002) e Cunha (2004).

## 4.2 PARÂMETROS MECÂNICOS

A realização dos ensaios mecânicos se deu após a determinação das medidas dos corpos de prova. Para cada ensaio, foi utilizado o número de corpos de prova (réplicas) descrito no item 3.4.3.

### 4.2.1 Resistência à Tração e Módulo de Resiliência

Os ensaios de Resistência à Tração foram realizados conforme norma NBR 15087 - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral (2004) e os resultados encontrados para as misturas estudadas

encontram-se na Tabela 21 e na Figura 48. Os valores apresentados nesta tabela compreendem a média dos seis valores encontrados para cada mistura.

Tabela 21– Resultados da Resistência à Tração (MPa) para as misturas estudadas

Mistura	Resistência à Tração (MPa)
Tradicional	1,47
Bailey	1,72
Bailey MEE + 5%	2,06
Bailey AG + 0,2	1,82

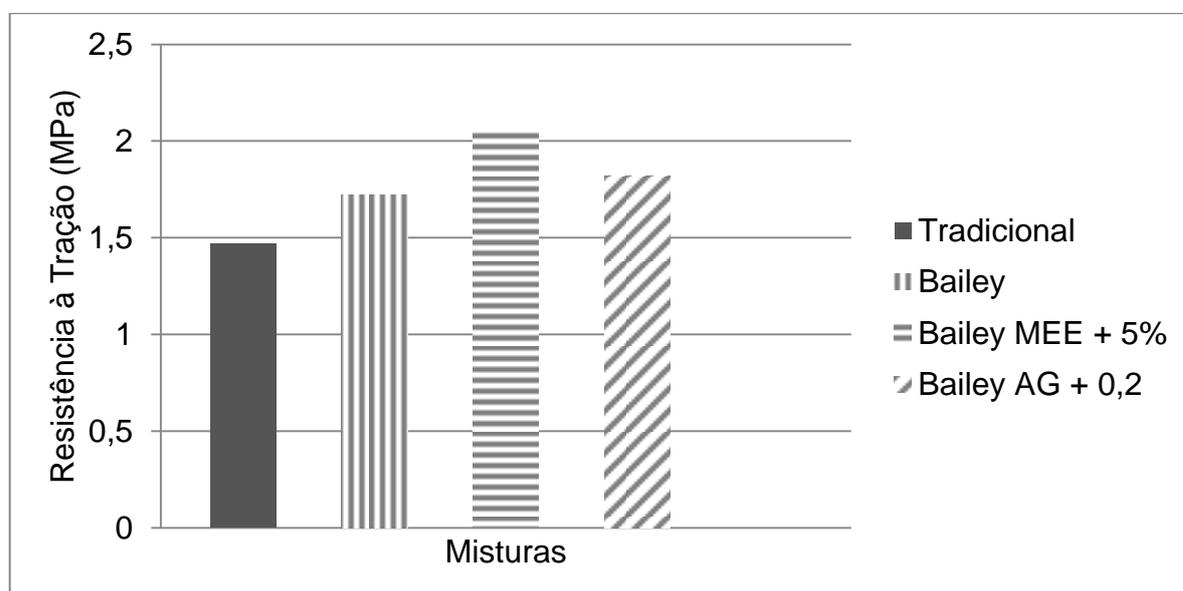


Figura 48– Resistência à Tração (MPa) para as misturas estudadas

Observa-se que os maiores valores para a Resistência à Tração foram encontrados nas misturas que utilizaram o Método Bailey para a determinação do esqueleto mineral em comparação com a mistura tradicional. Esse resultado era esperado, uma vez que o objetivo do método é proporcionar um melhor intertravamento do esqueleto mineral, gerando misturas mais resistentes.

Analisando os resultados, observa-se que as misturas Bailey e Bailey AG + 0,2 apresentaram resultados muito próximos (1,72 MPa e 1,82 MPa), o que era esperado, uma vez que suas composições granulométricas são muito parecidas.

Com relação às três misturas que tiveram seu esqueleto mineral determinado pelo Método Bailey, a mistura Bailey MEE + 5% foi a que apresentou os maiores

resultados, proporcionando um aumento de 19,8% em relação à mistura Bailey e de 40,1% em relação à mistura tradicional. Com o aumento da massa específica escolhida, elevou-se a proporção AG da mistura em 0,4, aumentando a quantidade de agregado graúdo da mistura. Esse aumento conduziu a um maior intertravamento da parte graúda da mistura, elevando sua resistência à tração.

Os ensaios de Módulo de Resiliência foram realizados conforme descrito no 2.4.1 e os resultados encontrados para as misturas estudadas encontram-se na Tabela 22 e na Figura 49. O valor apresentado nesta tabela compreende a média dos seis valores encontrados para cada mistura.

Tabela 22– Resultados da Módulo de Resiliência (MPa) para as misturas estudadas

Mistura	Módulo de Resiliência (MPa)
Tradicional	5232
Bailey	6957
Bailey MEE + 5%	10061
Bailey AG + 0,2	7998

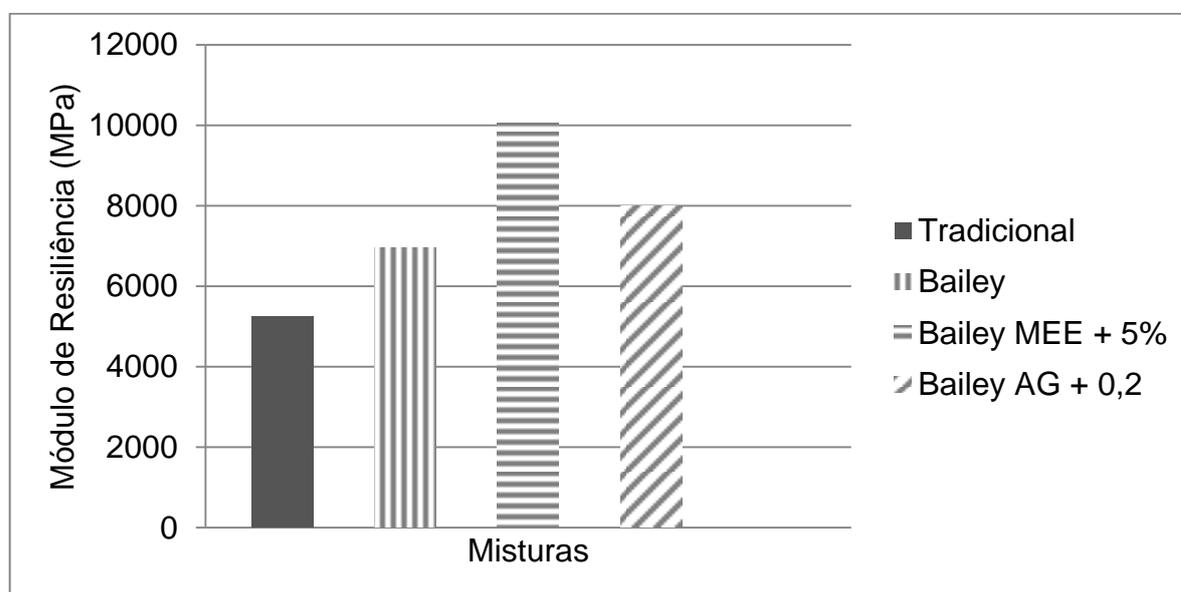


Figura 49– Módulo de Resiliência (MPa) para as misturas estudadas

Os resultados de Módulo de Resiliência indicam que o Método Bailey proporciona misturas com maior rigidez em comparação à mistura tradicional, ou seja, valores mais altos para o módulo de resiliência. Contudo, não se pode afirmar,

ainda, que as misturas que apresentam maiores valores de Módulo de Resiliência apresentem melhor desempenho, uma vez que as misturas devem apresentar flexibilidade suficiente para suportar as deformações e resistência à tração para evitar rupturas e terem rigidez compatível com a dos materiais das demais camadas do pavimento.

Através da análise dos resultados, podemos observar que os valores do MR mostraram a mesma tendência que os resultados obtidos para a RT. A mistura que apresentou o maior valor para o Módulo de Resiliência foi a mistura Bailey MEE + 5%, assim como no ensaio de RT. As misturas Bailey e Bailey AG + 0,2 apresentaram novamente valores próximos (6957 MPa e 7998 MPa) e acima dos valores obtidos para a mistura tradicional (5232 MPa).

A partir dos resultados de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência foram calculadas as relações MR/RT das misturas estudadas. Os resultados encontrados estão na Tabela 23 e na Figura 50.

Tabela 23– Relação MR/RT para as misturas estudadas

Mistura	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT
Tradicional	5232	1,47	3559
Bailey	6957	1,72	4045
Bailey MEE + 5%	10061	2,06	4884
Bailey AG + 0,2	7998	1,82	4395

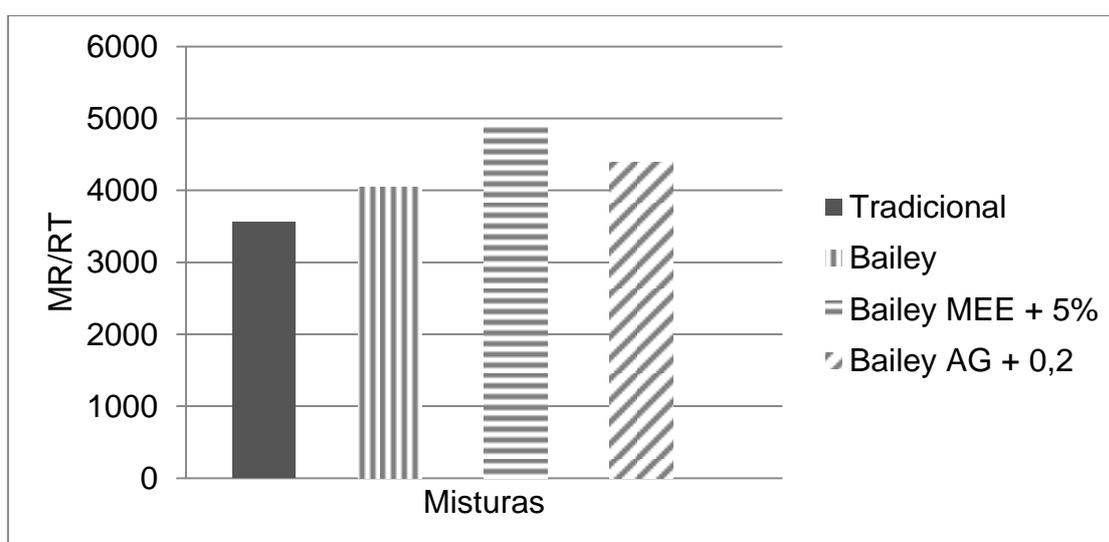


Figura 50– Relação MR/RT para as misturas estudadas

A relação entre MR/RT indica a compatibilidade entre a rigidez e a resistência à tração da mistura asfáltica. Através da análise dos valores encontrados, podemos observar que os maiores valores para a relação MR/RT se deram nas misturas mais rígidas, cujo módulo de resiliência é maior. As misturas rígidas, com MR elevado, necessitam de altos valores de RT, devido à concentração de esforços em seu interior (MORILHA JUNIOR, 2004).

Alguns pesquisadores acreditam que menores valores da relação MR/RT resultem em misturas com maior vida de fadiga, mas a relação MR/RT foi criada com a finalidade de atender as universidades que não dispunham de equipamento necessário para a realização do ensaio de Módulo de Resiliência (LOPES et. al, 2004). O menor valor para a relação MR/RT foi encontrado na mistura Tradicional (3559).

Em estudos realizados por Vale (2007), não houve correlação evidente entre o valor da relação e dos valores encontrados para a Vida de Fadiga. Sendo assim, os resultados encontrados para essa relação devem ser analisados para cada caso.

#### 4.2.3 Vida de Fadiga

O programa utilizado durante a realização dos ensaios de Vida de Fadiga, assim como o descrito no 2.4.3, gera relatórios dos ensaios que foram realizados, reproduzidos aqui. Os resultados encontrados para as misturas estudadas encontram-se nas Figuras 51 e 52 e descrevem a vida de fadiga através das relações “Número de Repetições de Carga” x “Diferença de tensões” e “Número de Repetições de Carga” x “Deformações Específicas”.

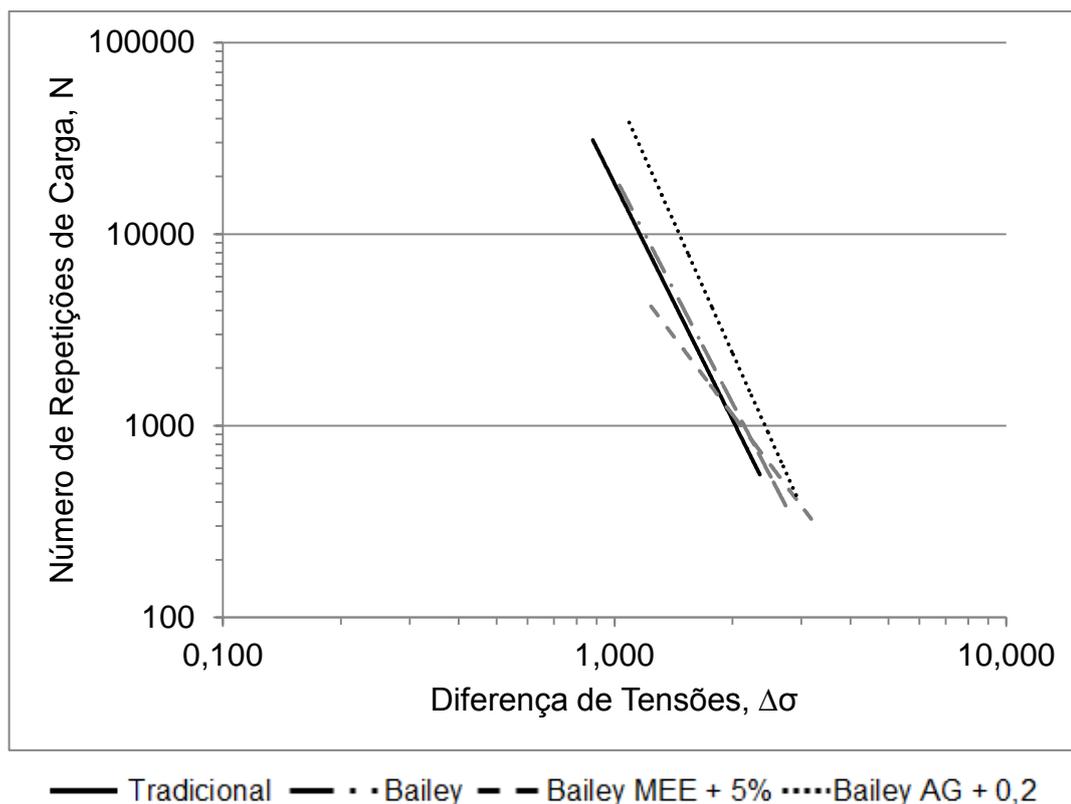


Figura 51– Número de Repetições (N) x Diferença de Tensões ( $\Delta\sigma$ ) para as misturas estudadas

As equações obtidas através de regressão linear para as curvas demonstradas na Figura 51 são:

- Mistura Tradicional:  $y = 18349 \cdot x^{-4,094}$ ,  $R^2 = 0,9719$  (14)

- Mistura Bailey:  $y = 20173 \cdot x^{-3,941}$ ,  $R^2 = 0,9192$  (15)

- Mistura Bailey MEE + 5%:  $y = 7511,3 \cdot x^{-2,713}$ ,  $R^2 = 0,8838$  (16)

- Mistura Bailey AG + 0,2:  $y = 56806 \cdot x^{-4,566}$ ,  $R^2 = 0,9783$  (17)

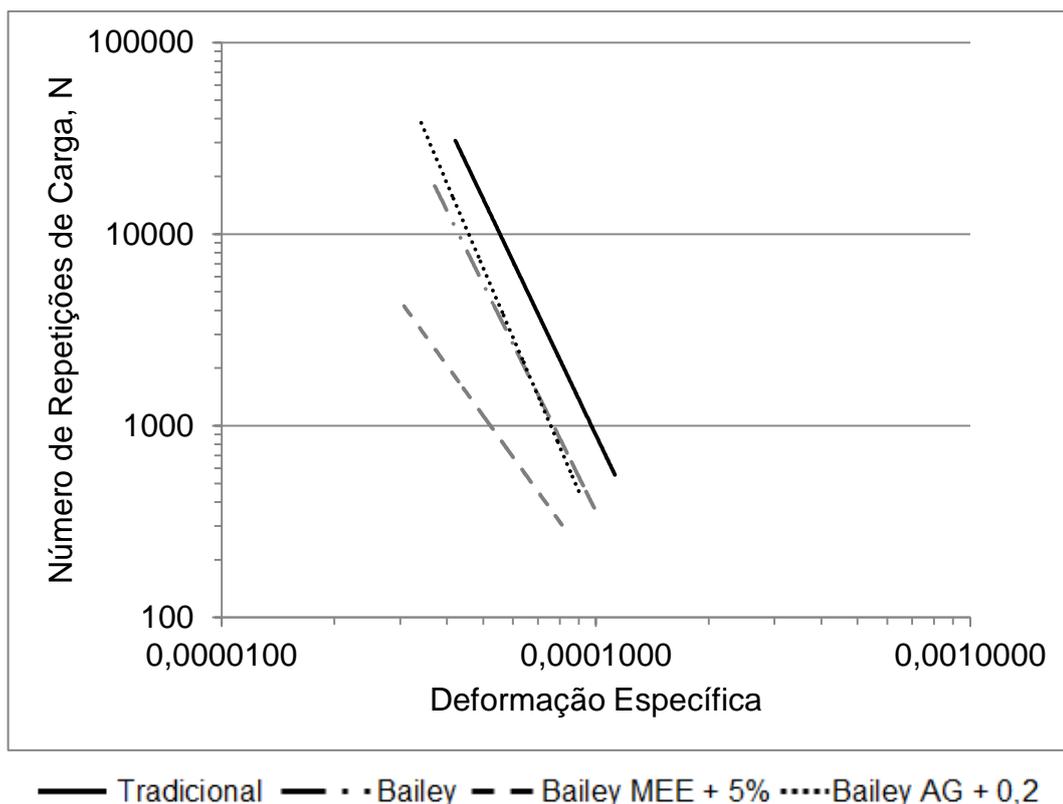


Figura 52– Número de Repetições (N) x Deformação Específica para as misturas estudadas

As equações obtidas para as curvas demonstradas na Figura 52 são:

- Mistura Tradicional:  $y = 4 \cdot E^{-14} \cdot x^{-4,092}$ ,  $R^2 = 0,9726$  (18)

- Mistura Bailey:  $y = 6 \cdot E^{-14} \cdot x^{-3,943}$ ,  $R^2 = 0,9201$  (19)

- Mistura Bailey MEE + 5%:  $y = 3 \cdot E^{-9} \cdot x^{-2,706}$ ,  $R^2 = 0,8853$  (20)

- Mistura Bailey AG + 0,2:  $y = 2 \cdot E^{-16} \cdot x^{-4,562}$ ,  $R^2 = 0,9778$  (21)

Analisando a Vida de Fadiga através da variação de diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ ), observa-se que a Mistura Bailey AG + 0,2 apresentou os melhores resultados enquanto a Mistura Bailey MEE + 5% apresentou os resultados mais conservadores. A vida de fadiga para as Misturas Tradicional e Bailey apresentaram valores muito próximos.

A análise das curvas obtidas com o ensaio de fadiga com a finalidade de saber qual delas apresenta melhor resultado, não é feita de forma simples e direta. A tendência comentada anteriormente só é válida para diferença de tensões inferior a

2,0 MPa. Sob a ótica da diferença de tensões, a mistura que apresentou o maior valor de MR/RT (Bailey MEE + 5%) foi a que apresentou a menor vida de fadiga.

Ao analisar a Vida de Fadiga por meio da variação da deformação específica, observa-se que a Mistura Tradicional apresentou os melhores resultados e a Mistura Bailey MEE + 5% apresentou, novamente, os valores mais conservadores. As misturas Bailey e Bailey AG + 0,2 apresentaram resultados muito próximos entre si e valores intermediários com relação às duas misturas citadas anteriormente (Tradicional e MEE + 5%).

A mistura Tradicional apresentou os menores resultados para a relação MR/RT e também os melhores resultados para a Vida de Fadiga. A mistura Bailey MEE + 5% obteve o maior valor de MR/RT e a menor Vida de Fadiga.

#### 4.2.4 Creep Estático

O ensaio de Creep Estático, mais conhecido como Deformação Permanente seguiu as recomendações do Laboratório de Pavimentos da COPPE/UFRJ descritos no item 2.4.2, uma vez que os procedimentos não são normatizados. Os resultados representam a média dos ensaios realizados nos corpos de prova e estão representados na Figura 53.

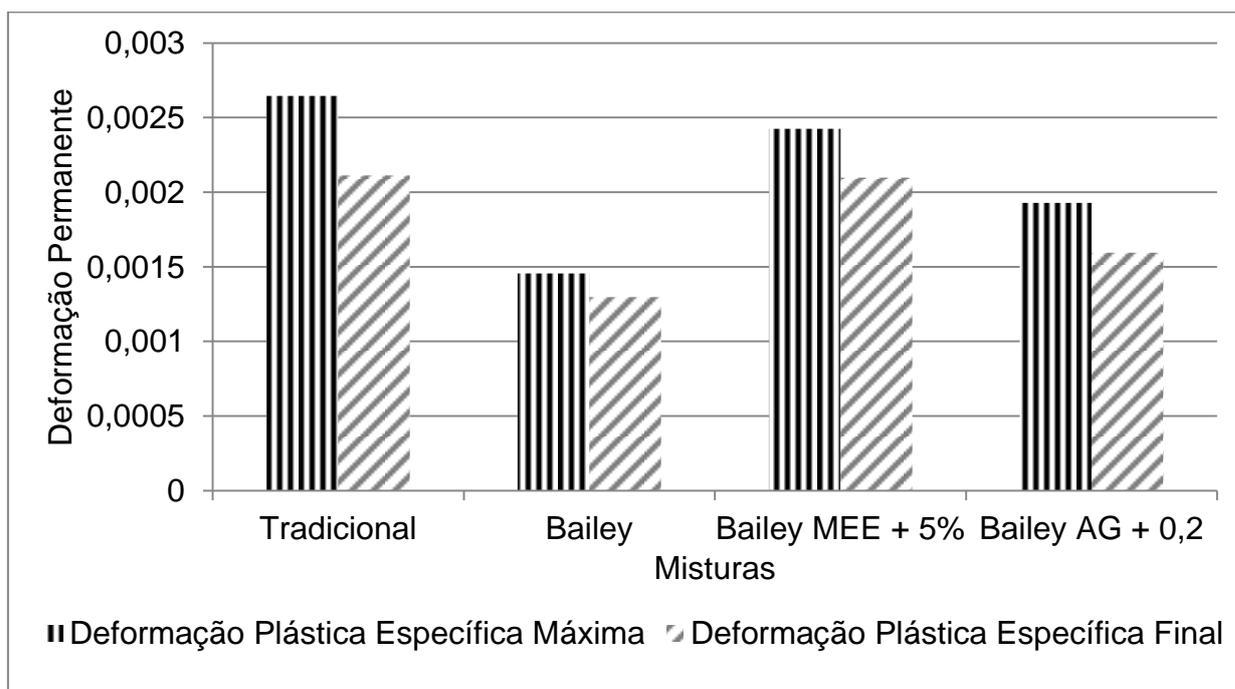


Figura 53– Deformação Permanente das misturas estudadas

Com relação à deformação permanente, os melhores resultados obtidos foram para a mistura dosada pelo Método Bailey, sem alteração nos parâmetros granulométricos iniciais, onde ocorreram os menores valores para deformação específica máxima e deformação específica final.

As modificações provocadas no esqueleto mineral sugeridas pelo método Bailey trouxeram, com relação a este parâmetro, melhorias de desempenho quanto à diminuição das deformações permanentes em comparação à mistura Tradicional.

Deve-se observar, porém, que os resultados da deformação permanente, obtidos de acordo com o item 2.4.2 e utilizados neste trabalho requerem análises mais detalhadas, uma vez que a dispersão dos resultados é grande, necessitando de um número maior de corpos de prova para um melhor entendimento. A fim de obter melhores resultados, deve-se ampliar o número de corpos de prova analisados e deve-se padronizar o tempo de permanência (2 horas) dos corpos de prova utilizados no equipamento.

Apesar das dificuldades encontradas, a mistura Bailey foi a que apresentou os menores valores para a deformação permanente. Esse resultado indica que as misturas dosadas pelo Método Bailey são mais resistentes à deformação permanente, um dos principais problemas enfrentados em misturas asfálticas utilizadas para pavimentação urbana.

#### 4.2.5 Análise da Compactação Giratória

Para analisar a compactação giratória, utilizaram-se os parâmetros obtidos através das curvas geradas pelo compactador giratório (número de giros x %Gmm). A partir destas curvas foram obtidos os parâmetros CDI e TDI conforme mostrado no item 2.3.3. Os resultados obtidos em todas as misturas estudadas para esses parâmetros encontram-se na Tabela 24 e na Figura 54. Os valores apresentados foram obtidos para cada CP e feito uma média de aproximadamente 20 corpos de prova, dependendo da mistura, uma vez que para cada mistura foram moldados, no mínimo, 21 corpos de prova.

Tabela 24– Parâmetros CDI e TDI

Mistura	CDI	TDI
Tradicional	185,0	157,3
Bailey	238,0	89,2
Bailey MEE + 5%	208,2	121,2
Bailey AG + 0,2	121,7	162,8

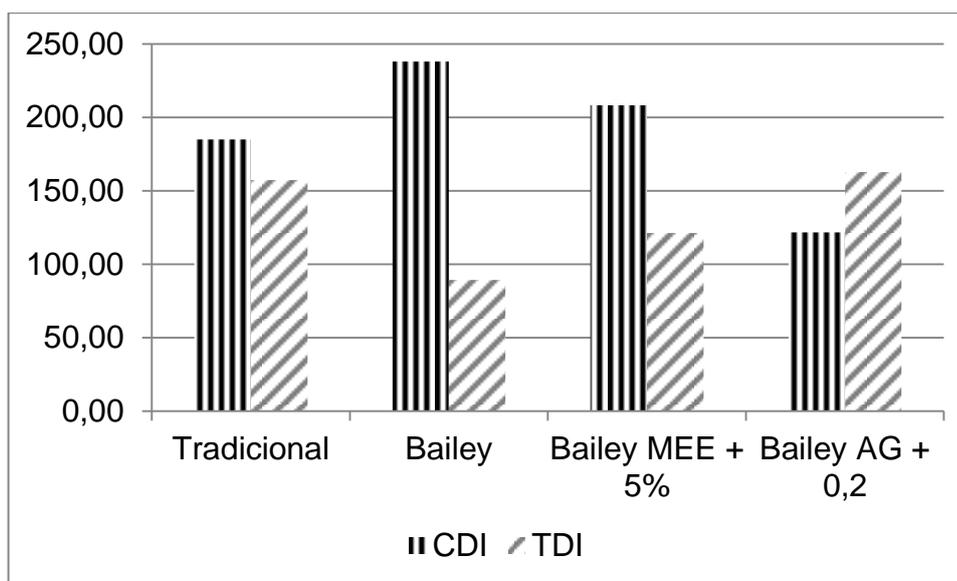


Figura 54– Valores obtidos para os parâmetros obtidos com as curvas de compactação

A utilização dos parâmetros de compactação CDI e TDI nos estudos de misturas asfálticas tem por objetivo auxiliar na escolha de misturas que sejam suficientemente trabalháveis durante a construção do revestimento e que sejam, ao mesmo tempo, suficientemente fortes para resistirem à densificação sob o tráfego.

Assim sendo, misturas com menores valores de CDI tendem a se densificar melhor inicialmente em campo e altos valores de TDI são mais desejáveis por indicar a necessidade de maior volume de tráfego para se densificar na fase final da vida do revestimento (BAHIA et al, 1998).

De acordo com os resultados da Tabela 24, observa-se que a mistura tradicional foi a que apresentou os valores simultâneos para o CDI e TDI mais próximos da recomendação de Bahia et al (1998), quando se comparam as misturas estudadas entre si (menor CDI e maior TDI).

Na realidade, a mistura que apresentou comparativamente o menor valor de CDI e maior valor de TDI foi a mistura Bailey AG + 0,2. Contudo, um esclarecimento

deve ser feito. Durante o processo de compactação desta mistura, ocorreu um problema técnico (a fonte do PC vinculado ao Compactador Giratório queimou) e até que o problema fosse solucionado levou-se 2 horas. Com isso, o início da compactação dos corpos de prova atrasou em 2 horas.

Acredita-se que este tempo a mais na estufa (totalizando 4 horas ao invés de 2 horas), tenha sido o responsável pela melhor densificação da mistura, semelhante ao que ocorre na prática, quando a mistura asfáltica é compactada com temperaturas próximas ao limite superior de operação. Como este fato ocorreu somente nesta mistura e para que não interferisse na comparação com as demais misturas, resolveu-se desconsiderar a Mistura Bailey AG + 0,2 desta análise. Acredita-se que não haverá prejuízo nas comparações, uma vez que esta mistura é muito parecida com a mistura Bailey.

Ao analisar as outras 3 misturas, observa-se que as misturas Bailey e Bailey MEE + 5% apresentam alto valores tanto para o CDI e baixos valores para o TDI em comparação com a mistura tradicional. Este fato mostra que as misturas cujo esqueleto mineral é dosado pelo Método Bailey tenderão a apresentar maior dificuldade de compactação inicial em campo e rápida densificação com o tráfego.

Esta era a expectativa inicial, uma vez que o esqueleto mineral proporcionado pelo Método Bailey são mais intertravados que os da mistura Tradicional, o que provocará uma dificuldade de compactação inicial no campo. Misturas densas como a Tradicional utilizada neste estudo tem maior facilidade de compactação devido à distribuição granulométrica contínua de seu esqueleto mineral.

Portanto, quanto à densificação final, que é avaliada através do parâmetro TDI, não se pode afirmar que as misturas com o proporcionamento de agregados através do Método Bailey apresentam resultados que indicam dificuldade de densificação. Os altos valores esperados para o TDI (acima de 250, segundo Nascimento (2008)), referem-se à alternativa de obtenção do parâmetro aos 98% da Gmm. Os corpos de prova utilizados neste trabalho foram compactados até 96% da Gmm, segundo exigência do Método SUPERPAVE. Dessa forma, os valores obtidos são inferiores àqueles que seriam obtidos caso os corpos de prova fossem compactados até o limite de 98% da Gmm.

Para efeito da compactação/densificação inicial, as misturas Bailey apresentam maior dificuldade, porém esta expectativa só poderá ser confirmada

durante a execução de trechos experimentais, já que este estudo de laboratório visa mostrar esta característica da mistura ainda na fase de dosagem.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSÕES

O objetivo central desse trabalho foi o de analisar os efeitos da graduação dos agregados no desempenho de misturas asfálticas, através da comparação entre misturas dosadas utilizando o Método Bailey para o proporcionamento dos agregados e misturas dosadas por método volumétrico tradicional, o método SUPERPAVE.

Com base nos resultados obtidos através das misturas estudadas, foi possível obter as seguintes conclusões:

- A mistura dosada pelo Método Tradicional, no que diz respeito à resistência à tração, apresentou menor valor do que aqueles encontrados para as misturas que utilizaram o Método Bailey. Esse resultado já era esperado, uma vez que um dos benefícios do método é proporcionar o melhor intertravamento das misturas.
- Para o Módulo de Resiliência, os maiores valores foram obtidos para misturas cujo esqueleto mineral foi dosado pelo Método Bailey, especialmente para a mistura com alteração na Massa Específica Escolhida, comprovando o melhor intertravamento das misturas que utilizaram esse método.
- Ainda com relação ao Módulo de Resiliência, os maiores valores obtidos são correspondentes aos maiores valores de Resistência à Tração, uma vez que misturas com maiores valores de Resistência à Tração necessitam de Módulo de Resiliência maiores, para resistir às tensões a que a mistura está sujeita.
- A partir da análise da relação MR/RT, observa-se que os maiores valores obtidos para esta relação estão nas misturas cujo esqueleto mineral foram dosados pelo Método Bailey, indicando boa capacidade estrutural das misturas que utilizaram este método, uma vez que, para valores elevados de MR é desejável que se tenha maiores valores de RT.
- Os resultados do ensaio de vida de fadiga mostraram que os valores obtidos para o desempenho das Misturas Bailey e Bailey AG + 0,2 são superiores à mistura tradicional, especialmente para as diferenças de tensões abaixo de

2,0MPa, o que pode ser um bom indicativo de uso dessas misturas em revestimento de pavimentos com alta solicitação de tráfego.

- Com relação à deformação permanente, os melhores resultados ocorreram para a mistura dosada pelo Método Bailey, ou seja, essa mistura obteve menores deformações que as demais, indicando sua adequabilidade ao uso.
- A análise dos parâmetros de densificação CDI e TDI para a previsão de comportamento in situ indicaram que a mistura Tradicional deverá apresentar uma facilidade maior de para se densificar na fase inicial da vida de projeto (entre a aplicação e a compactação no campo), uma vez que apresentou menor valor para o CDI e valores elevados para o TDI.
- A análise das misturas proporcionadas através do método Bailey indicaram uma maior dificuldade de compactação na fase inicial, o que é esperado em função do maior intertravamento dos agregados, mostrado pelos outros parâmetros analisados.
- Quanto à densificação final (entre a compactação e a vida final), o parâmetro TDI para previsão de comportamento não pode ser considerado neste trabalho.

Após a análise de todos os fatores estudados, pode-se dizer que a mistura dosada utilizando o Método Bailey para o proporcionamento dos agregados apresentou melhor desempenho geral que aquela dosada pelo método tradicional. Sendo assim, sua utilização pode ser indicada para a obtenção de esqueletos minerais durante os procedimentos de dosagem de misturas asfálticas para uso em revestimentos flexíveis.

## 5.2 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- A principal recomendação para a elaboração de trabalhos futuros é a de estudar mais o Método Bailey no que diz respeito a utilização de agregados brasileiros, uma vez que trabalhos realizados com tais agregados ainda são escassos.

- A realização de trechos experimentais com o esqueleto mineral dosado pelo Método Bailey é imprescindível para atestar a aplicabilidade de tal método e verificar seu comportamento diante de condições reais.
- Utilização de outro ensaio para a determinação da deformação permanente, já que o ensaio utilizado mostrou grande dispersão dos resultados. O ensaio de Flow Number aparece como um bom indicativo para a determinação desta característica.
- Elaborar análises mecánísticas em estruturas hipotéticas de pavimento, utilizando as misturas estudadas neste trabalho, por meio dos resultados dos ensaios de Fadiga e Deformação Permanente obtidos nesta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

AASHTO, 2009, **Standard Method of Test for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate American Association of State Highway and Transportation Officials**, AASHTO T19, Washington, D. C.

ABNT, 2001a. **Agregado Graúdo** – Ensaio de Abrasão “Los Angeles”. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR NM 51.

ABNT, 2001b. **Agregados** - Redução da Amostra de Campo para Ensaio de Laboratório. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR NM 27.

ABNT, 2003. **Agregados** – Determinação da Composição Granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR NM 248.

ABNT, 2004. **Misturas asfálticas** – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 15087.

ABNT, 2005, **Agregados** – Terminologia. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 9935.

ANTT, 2008. **Anuário Estatístico dos Transportes Terrestres (AETT)**. Disponível em [http://201.57.54.6/InformacoesTecnicas/aett/aett\\_2008/1.1.1.asp](http://201.57.54.6/InformacoesTecnicas/aett/aett_2008/1.1.1.asp). Acesso em: 28 dez 2010.

ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook**. Lexington, Manual Series N°4 (MS-4), 599p. 1989.

ASTM, 1979. **Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures**, ASTM E 206-72, USA.

ASTM, 2006. **Standard Test Method for Index of Aggregate Particle Shape and Texture**. ASTM D 3398, USA

ASTM, 2006. **Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate** (As Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading). ASTM C 1252, USA.

ASTM, 2010. **Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate**. ASTM D 4791, USA.

BAHIA, H. U., FRIEME, T. P., PETERSON, P. A., et al, 1998, **Optimization of Constructibility and Resistance to Traffic: A New Design Approach for HMA Using the Superpave Compactor**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, volume 67, pp. 189-232.

BARDINI, V. S. S. **Estudo de Viabilidade Técnica da Utilização de Cinzas da Queima da Casca de Pinus em Obras de Pavimentação Asfáltica**. 2008. 192 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil. 2008.

BERNUCCI, LiediBariani; et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica Para Engenheiros**. Rio de Janeiro. PETROBRAS; Abeda. 2007.

Confederação Nacional do Transporte (CNT). **Pesquisa CNT de Rodovias: Relatório**. 2010. Disponível em: <<http://www.sistemacnt.org.br/pesquisacntrodovias/2010/>>. Acesso em 20 out 2010.

CUNHA, M. B. **Avaliação do Método de Bailey de Seleção Granulométrica de Agregados para Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil. 2004.

CUNHA, M. B.; GOUVEIA, L. T.; MOTTA, L. M. G.; FERNANDES JR., J. L.. **Influência dos Agregados sobre Propriedades Mecânicas e Volumétricas de Misturas Asfálticas: Análise do Método Bailey**. In: XVII ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2004, Florianópolis-SC. Anais do XVII ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2004.

DNER, 1994a. **Agregados**– Determinação do índice de forma. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Método de Ensaio DNER ME 086/94.

DNER, 1994b. **Agregados** – Avaliação da Durabilidade pelo Emprego de Soluções de Sulfato de Sódio ou de Magnésio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Método de Ensaio DNER ME 089/94.

DNER, 1994c. **Agregado Graúdo**– adesividade a ligante betuminoso. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Método de Ensaio DNER ME 078/94.

DNER, 1994d. **Agregados** – adesividade a ligante betuminoso. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Método de Ensaio DNER ME 079/94.

DNER, 1994e. **Agregado** – determinação do índice de forma. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Método de Ensaio DNER ME 086/94.

DNER, 1997. **Coleta de Amostras de Agregados**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Procedimento DNER PRO 120/97.

DNER, 1997. **Equivalente de areia**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Método de Ensaio DNER ME 054/97.

DNER, 1999. **Agregados** – determinação da perda ao choque no aparelho Treton. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Método de Ensaio DNER ME 399/99.

DNIT, 2006. Pavimentos Flexíveis – **Concreto Asfáltico**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, Especificação de Serviço DNIT – ES 031/2006.

DNIT, 2010. Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – **Determinação do Módulo de Resiliência** – Método de Ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, Especificação de Serviço DNIT – ME 135/2010.

GENELHU, T. S. **Estudo de Misturas Asfálticas Utilizando-se Ensaio Dinâmicos**. 2009. 65p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – UFJF, Juiz de Fora, MG, Brasil. 2009

GOUVEIA, L. T. **Contribuições ao estudo da influência de propriedades de agregados no comportamento de misturas asfálticas densas**. 2006. 340p. Tese

(Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil. 2006.

GOUVEIA, L. T. **Avaliação do Ensaio de Angularidade do Agregado Fino (FAA) da Especificação SUPERPAVE**. 2002. 165 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil. 2002.

HARMAN, T.; BUKOWSKI, J. R.; MONTIER F. et al. **The History And Future Challenges of Gyratory Compaction from 1939 to 2001**. In: Transportation Research Board - TRB, Washington, D. C., EUA. 2002.

ILDEFONSO, J. S. **Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Copolímero Etileno Acetato de Vinila (EVA) Descartado Pela Indústria Calçadista em Misturas Asfálticas (Processo a Seco)**. 2007. 335 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil. 2007.

LOPES, M. M. ; ONOFRE, F. C. ; VALE, A. C. do ; SOARES, J. B. **Estudo Laboratorial de Misturas Asfálticas SMA 12,5mm Dosadas com Diferentes tipos de Ligantes Asfálticos**. In: XV Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte (PANAM), 2008, Cartagena de Indias, Colombia.. XV Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte (PANAM), 2008.

MAHMOUD, A. F. F.; BAHIA, H. **Using the Gyratory Compactor to Measure Mechanical Stability of Asphalt Mixtures**. Wisconsin highwayresearchprogram0092-01-02. Madison, Wisconsin, EUA, Outubro, 2004.

MARQUES, G. L. O. **Curso de Pavimentação Urbana**. Associação Brasileira de Pavimentação – ABPv. Rio de Janeiro. 2011.

MARQUES, G. L. O. **Procedimentos de Avaliação e Caracterização de Agregados Minerais Usados na Pavimentação Asfáltica**. 2001. 116 p. 1<sup>o</sup> Seminário de Qualificação Acadêmica ao Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2001.

MARQUES, G. L. O. **Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica**; efeito da compactação por impacto e giratória. 2004. 461p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2004.

MARQUES, G. L. O., RAMIRO, T. T., MOTTA, L. M. G. **Influência dos Índices de Energia de Densificação nos Valores de Módulo de Resiliência de Misturas Asfálticas**. In: XV Congresso Ibero-LatinoAmericano do Asfalto, 2009, Lisboa. XV Congresso Ibero-LatinoAmericano do Asfalto. Braga - Portugal : Barbosa & Xavier, Lda., 2009. v. 1. p. 395-404.

MARQUES, G. L. O.; RAMIRO, T. T.; MOTTA, L. M. G. **Utilização de Índices de Energia de Densificação na Avaliação de Desempenho de Misturas Asfálticas**. In: XXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - XXI ANPET, 2007, Rio de Janeiro.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2ª edição, Rio de Janeiro, RJ, Editora UFRJ, 2005.

MORILHA JR, A. **Estudos Sobre a Ação de Modificadores no Envelhecimento dos Ligantes Asfálticos e nas Propriedades Mecânicas e de Fadiga das Misturas Asfálticas**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina.

MOTTA, L. M. G.; Tonial, I.; Leite, L. M. e Constantino, R. S. **Princípio do Projeto e Análise SUPERPAVE de Misturas Asfálticas**. Tradução comentada da publicação FHWA-SA-95-003 Federal HighwayAdministration. IBP, 1996.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente**. 2008. 204p. Dissertação (Mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil. 2008.

PEDRA SUL. **Pedra Sul**. 2011. Disponível em:  
<<http://www.flickr.com/photos/pedrasul/5733839903/in/set-72157626626382331/>>.  
Acesso em 18 nov 2011.

ROBERTS, F. L. et al. **Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction**. NAPA Research and Education Foundation, Lanham, Maryland, 1996, 2<sup>a</sup> edição. NCAT.

VALE, A.C. (2007). **Estudo Laboratorial da Viabilidade do Uso de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas do Tipo SMA**. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 125 fl.

VAVRIK, W. R.; HUBER, G.; PINE, W. et al. **Bailey Method for Gradation Selection in HMA Mixture Design**. Transportation Research Board: Transportation Research Circular Number E-C044, Washington, D. C., EUA. Outubro. 2002.

VAVRIK, W. R.; PINE, W. J.; HUBER, G.; et al. **The Bailey Method of Gradation Evaluation: The Influence of Aggregate Gradation and Packing Characteristics on Voids in the Mineral Aggregate**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 70, p. 132-175. 2001.

.

## **ANEXO A – PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS DAS MISTURAS ESTUDADAS**

Este anexo contém os parâmetros volumétricos de todos os corpos de prova confeccionados para essa pesquisa. Cada tabela representa uma mistura e contém os valores para o teor de asfalto dentre outros parâmetros.

Tabela A.1 – Parâmetros Volumétricos dos corpos de prova confeccionados para a mistura Tradicional

Parâmetros	Corpos de Prova da Mistura Tradicional											
Número do Corpo de Prova	Ncp	82	83	84	85	86	87*	88	89	90**	91**	92**
Teor de Asfalto	t	5,14%										
Densidade Máxima Medida	Gmm	2,524										
Altura (cm)	H	6,43	6,45	6,48	6,47	6,43	6,41	6,47	6,56	6,42	6,40	6,26
Diâmetro (cm)	D	9,99	10,00	9,98	10,00	10,00	9,98	10,00	10,01	10,00	10,00	9,99
Massa Seca (g)	Ms	1180,4	1182,1	1180,1	1182,6	1178,5	1172,7	1175,7	1180,9	1180,6	1174,4	1177,1
Massa Imersa (g)	Mi	695,5	696,8	693,7	697,6	694,7	690,9	693,7	694,5	697,9	693,1	701,9
Massa Úmida (g)	Mu	1183,2	1186,0	1184,4	1185,9	1181,4	1185,5	1180,1	1185,4	1182,7	1178,1	1178,2
Densidade Aparente	Gmb	2,420	2,416	2,405	2,422	2,421	2,371	2,417	2,406	2,435	2,421	2,471
Volume de Vazios (%)	Vv	4,11	4,26	4,72	4,05	4,06	6,06	4,23	4,69	3,52	4,06	2,09
Vazios do Agregado Mineral (%)	VAM	15,97	16,10	16,50	15,91	15,93	17,68	16,08	16,48	15,45	15,93	14,20
Relação Betume Vazios (%)	RBV	74,28	73,53	71,41	70,10	74,48	65,71	73,67	71,53	77,24	74,49	85,30
Parâmetros	Corpos de Prova da Mistura Tradicional											
Número do Corpo de Prova	Ncp	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	
Teor de Asfalto	t	5,14%										
Densidade Máxima Medida	Gmm	2,524										
Altura (cm)	H	6,35	6,43	6,33	6,45	6,45	6,44	6,40	6,49	6,46	6,45	
Diâmetro (cm)	D	9,99	9,99	9,97	9,98	9,99	10,00	9,98	9,99	9,99	9,99	
Massa Seca (g)	Ms	1174,9	1175,9	1179,9	1177,7	1178,7	1175,9	1176,1	1175,4	1175,7	1176,7	
Massa Imersa (g)	Mi	695,6	694,3	696,9	694,0	694,6	694,1	696,3	690,7	693,1	693,5	
Massa Úmida (g)	Mu	1177,2	1180,5	1183,0	1180,0	1181,0	1179,2	1179,7	1180,0	1179,2	1182,0	
Densidade Aparente	Gmb	2,440	2,419	2,427	2,423	2,423	2,424	2,433	2,402	2,419	2,409	
Volume de Vazios (%)	Vv	3,34	4,18	3,83	3,99	3,99	3,96	3,61	4,83	4,17	4,56	
Vazios do Agregado Mineral (%)	VAM	15,30	16,03	15,73	15,87	15,86	15,84	15,53	16,60	16,03	16,37	
Relação Betume Vazios (%)	RBV	78,14	73,94	75,63	74,84	74,85	74,99	76,77	70,92	73,95	72,11	

\* O corpo de prova apresentou problemas de compactação e foi descartado \*\* Os corpos de prova foram compactados até 205 giros na tentativa de chegar a 98% da Gmm

Tabela A.2 – Parâmetros Volumétricos dos corpos de prova confeccionados para a mistura Bailey

Parâmetros	Corpos de Prova da Mistura Bailey											
Número do Corpo de Prova	Ncp	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113
Teor de Asfalto	t	4,22%										
Densidade Máxima Medida	Gmm	2,528										
Altura (cm)	H	6,43	6,41	6,50	6,51	6,50	6,60	6,54	6,54	6,65	6,62	6,60
Diâmetro (cm)	D	10,00	10,00	10,00	10,00	9,99	10,00	10,01	10,00	10,01	10,01	9,99
Massa Seca (g)	Ms	1178,2	1187,4	1183,3	1175,7	1175,0	1170,3	1173,9	1174,1	1176,4	1180,1	1182,8
Massa Imersa (g)	Mi	695,4	703,3	695,6	694,0	695,6	684,6	692,1	690,2	690,8	694,1	693,8
Massa Úmida (g)	Mu	1183,1	1188,9	1190,3	1181,8	1182,3	1181,5	1183,4	1183,1	1188,4	1187,5	1194,3
Densidade Aparente	Gmb	2,416	2,445	2,392	2,410	2,414	2,355	2,389	2,382	2,364	2,392	2,363
Volume de Vazios (%)	Vv	4,44	3,27	5,38	4,66	4,50	6,84	5,48	5,77	6,48	5,39	6,52
Vazios do Agregado Mineral (%)	VAM	14,16	13,11	15,00	14,36	14,21	16,31	15,10	15,36	15,99	15,01	16,02
Relação Betume Vazios (%)	RBV	68,65	75,03	64,13	67,54	68,33	58,09	63,67	62,40	59,47	64,10	59,33
Parâmetros	Corpos de Prova da Mistura Bailey											
Número do Corpo de Prova	Ncp	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	
Teor de Asfalto	t	4,22%										
Densidade Máxima Medida	Gmm	2,528										
Altura (cm)	H	6,62	6,56	6,56	6,51	6,60	6,63	6,58	6,60	6,60	6,55	
Diâmetro (cm)	D	10,01	10,01	10,01	10,00	10,01	9,99	10,01	10,00	10,00	10,00	
Massa Seca (g)	Ms	1179,6	1182,9	1179,0	1175,2	1182,3	1176,8	1184,6	1182,1	1178,0	1182,8	
Massa Imersa (g)	Mi	694,1	696,2	691,2	691,8	695,1	692,0	696,3	695,8	694,6	697,9	
Massa Úmida (g)	Mu	1186,4	1192,1	1189,3	1184,6	1193,5	1190,8	1196,1	1194,1	1186,2	1192,8	
Densidade Aparente	Gmb	2,396	2,385	2,367	2,385	2,372	2,359	2,370	2,372	2,396	2,390	
Volume de Vazios (%)	Vv	5,22	5,64	6,37	5,67	6,16	6,67	6,24	6,16	5,21	5,46	
Vazios do Agregado Mineral (%)	VAM	14,86	15,24	15,89	15,26	15,71	16,17	15,78	15,70	14,85	15,07	
Relação Betume Vazios (%)	RBV	64,87	62,97	59,92	62,87	60,76	58,71	60,43	60,77	64,91	63,78	

Tabela A.3 – Parâmetros Volumétricos dos corpos de prova confeccionados para a mistura Bailey MEE + 5%

Parâmetros	Corpos de Prova da Mistura Bailey MEE + 5%											
Número do Corpo de Prova	Ncp	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182
Teor de Asfalto	t	4,66%										
Densidade Máxima Medida	Gmm											
Altura (cm)	H	6,45	6,48	6,50	6,50	6,50	6,50	6,55	6,49	6,51	6,54	6,41
Diâmetro (cm)	D	9,99	9,99	9,99	9,98	10,00	9,99	10,02	9,99	9,98	10,00	9,99
Massa Seca (g)	Ps	1186,9	1184,8	1185,6	1186,6	1187,2	1184,6	1187,9	1185,4	1188,9	1184,1	1185,4
Massa Imersa (g)	Pi	699,2	700,5	698,2	689,9	699,0	696,1	697,4	697,9	699,7	695,2	699,0
Massa Úmida (g)	Pu	1189,8	1187,7	1189,0	1190,0	1190,8	1188,6	1191,4	1189,0	1192,3	1189,1	1187,6
Densidade Aparente	Gmb	2,419	2,432	2,416	2,373	2,414	2,405	2,405	2,414	2,414	2,397	2,426
Volume de Vazios (%)	Vv	4,75	4,26	4,90	6,59	4,96	5,30	5,33	4,97	4,98	5,61	4,48
Vazios do Agregado Mineral (%)	VAM	15,50	15,06	15,63	17,13	15,68	15,99	16,01	15,69	15,70	16,26	15,26
Relação Betume Vazios (%)	RBV	69,34	71,73	68,67	61,55	68,37	66,83	66,72	68,33	68,29	65,49	70,62
Parâmetros	Corpos de Prova da Mistura Bailey MEE + 5%											
Número do Corpo de Prova	Ncp	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	
Teor de Asfalto	t	4,66%										
Densidade Máxima Medida	Gmm											
Altura (cm)	H	6,49	6,47	6,51	6,41	6,53	6,55	6,31	6,54	6,50	6,46	
Diâmetro (cm)	D	9,99	9,98	10,00	9,98	9,98	9,99	10,00	9,99	9,96	9,96	
Massa Seca (g)	Ms	1190,2	1184,8	1187,2	1182,8	1178,5	1180,7	1176,4	1187,9	1176,2	1179,4	
Massa Imersa (g)	Mi	700,0	700,8	700,0	698,4	695,5	697,2	700,3	699,0	692,5	695,7	
Massa Úmida (g)	Mu	1194,7	1187,6	1190,9	1185,2	1182,2	1185,2	1178,6	1192,1	1179,9	1182,7	
Densidade Aparente	Gmb	2,406	2,434	2,418	2,430	2,421	2,419	2,460	2,409	2,413	2,422	
Volume de Vazios (%)	Vv	4,18	4,79	4,34	4,67	4,75	3,17	5,16	4,99	4,65	4,18	
Vazios do Agregado Mineral (%)	VAM	14,99	15,53	15,13	15,43	15,49	14,09	15,86	15,71	15,41	14,99	
Relação Betume Vazios (%)	RBV	72,12	69,18	71,32	69,73	69,37	77,52	67,49	68,23	69,80	72,12	

Tabela A.4 – Parâmetros Volumétricos dos corpos de prova confeccionados para a mistura Bailey AG + 0,2

Parâmetros	Corpos de Prova da Mistura Bailey AG + 0,2												
Número do Corpo de Prova	Ncp	148	149	150*	151	152	153	154	155	156	157	158	159
Teor de Asfalto	t	4,66%											
Densidade Máxima Medida	Gmm												
Altura (cm)	H	6,37	6,41	-	6,48	6,49	6,42	6,48	6,44	6,44	6,44	6,45	6,47
Diâmetro (cm)	D	10,00	9,99	-	10,00	9,98	9,99	10,00	9,98	9,99	10,00	10,00	9,99
Massa Seca (g)	Ms	1175,6	1174,2	-	1176,9	1176,1	1177,9	1176,2	1177,7	1180,3	1174,9	1174,1	1181,6
Massa Imersa (g)	Mi	694,5	689,9	-	694,3	687,7	689,5	691,0	689,9	693,5	689,2	688,7	694,3
Massa Úmida (g)	Mu	1177,6	1179,1	-	1180,7	1181,5	1173,9	1180,6	1180,9	1183,4	1178,3	1178,4	1185,7
Densidade Aparente	Gmb	2,433	2,400	-	2,420	2,382	2,432	2,402	2,399	2,409	2,402	2,398	2,405
Volume de Vazios (%)	Vv	3,13	4,45	-	3,68	5,19	3,20	4,36	4,52	4,09	4,37	4,55	4,28
Vazios do Agregado Mineral (%)	VAM	13,94	15,11	-	14,43	15,77	14,00	15,04	15,17	14,79	15,04	15,21	14,96
Relação Betume Vazios (%)	RBV	77,56	70,56	-	74,51	67,11	77,16	70,98	70,24	72,35	70,94	70,05	71,41
Parâmetros	Corpos de Prova da Mistura Bailey AG + 0,2												
Número do Corpo de Prova	Ncp	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171
Teor de Asfalto	t	4,66%											
Densidade Máxima Medida	Gmm												
Altura (cm)	H	6,54	6,51	6,47	6,52	6,52	6,51	6,58	6,51	6,53	6,57	6,49	6,52
Diâmetro (cm)	D	10,00	10,01	10,01	10,00	9,99	10,00	10,00	9,99	9,99	9,99	9,99	10,00
Massa Seca (g)	Ms	1175,9	1175,2	1176,2	1177,9	1177,7	1180,8	1178,6	1171,6	1178,5	1176,5	1178,8	1178,8
Massa Imersa (g)	Mi	690,7	692,5	690,4	694,3	693,5	694,6	695,6	689,0	695,3	692,8	694,5	695,3
Massa Úmida (g)	Mu	1178,4	1179,6	1179,9	1184,0	1182,2	1188,3	1185,6	1178,6	1186,3	1186,6	1184,6	1185,5
Densidade Aparente	Gmb	2,411	2,413	2,403	2,405	2,410	2,392	2,405	2,393	2,400	2,383	2,405	2,405
Volume de Vazios (%)	Vv	4,02	3,96	4,34	4,25	4,07	4,79	4,25	4,74	4,45	5,15	4,25	4,27
Vazios do Agregado Mineral (%)	VAM	14,73	14,67	15,02	14,93	14,77	15,41	14,94	15,37	15,11	15,74	14,94	14,95
Relação Betume Vazios (%)	RBV	72,73	73,04	71,07	71,57	72,47	68,94	71,54	69,17	70,55	67,25	71,54	71,44

\* O corpo de prova apresentou problemas de compactação e foi descartado

## **ANEXO B – RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS**

Este anexo contém todos os resultados dos ensaios mecânicos de todos os corpos de prova confeccionados para essa pesquisa. Cada tabela representa um ensaio realizado e seus resultados para cada mistura.

Tabela B.1 – Resultados do ensaio de Resistência à Tração para todos os corpos de prova estudados

Corpo de Prova	Mistura	Resistência à Tração (MPa)	Média (MPa)
82	Tradicional	1,44	1,47
83	Tradicional	1,51	
84	Tradicional	1,46	
85	Tradicional	1,50	
88	Tradicional	1,47	
89	Tradicional	1,46	
103*	Bailey	2,02	1,72
104	Bailey	1,88	
105	Bailey	1,77	
106	Bailey	1,70	
107	Bailey	1,66	
108	Bailey	1,58	
172	Bailey MEE + 5%	2,10	2,06
173	Bailey MEE + 5%	2,09	
174	Bailey MEE + 5%	2,00	
175	Bailey MEE + 5%	2,09	
176	Bailey MEE + 5%	2,13	
177	Bailey MEE + 5%	1,95	
148	Bailey AG + 0,2	1,80	1,82
149	Bailey AG + 0,2	1,75	
151	Bailey AG + 0,2	1,91	
152	Bailey AG + 0,2	1,66	
153	Bailey AG + 0,2	1,84	
154	Bailey AG + 0,2	1,95	

\* O corpo de prova foi descartado para a média dos valores, pois seu resultado se mostrou muito acima dos resultados dos outros corpos de prova

Tabela B.2 – Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência para todos os corpos de prova estudados

Corpo de Prova	Mistura	Módulo de Resiliência (MPa)			Média dos corpos de prova (MPa)	Média (MPa)
82	Tradicional	5502	5007	5042	5184	5232
83	Tradicional	5203	5302	5233	5246	
84	Tradicional	5448	5341	5001	5263	
85	Tradicional	5347	5309	4999	5218	
86	Tradicional	5300	5379	5041	5240	
88	Tradicional	5623	5048	5044	5238	
106	Bailey	6714	7022	6936	6891	6957
107	Bailey	6681	6163	6342	6395	
108	Bailey	6663	7069	6959	6897	
109	Bailey	7264	7433	7312	7336	
110	Bailey	7195	7504	7362	7354	
111	Bailey	6962	6295	7350	6869	
177	Bailey MEE + 5%	9788	10025	10102	9972	10490
178	Bailey MEE + 5%	11296	12203	12261	11920	
179	Bailey MEE + 5%	10121	8709	9454	9428	
180	Bailey MEE + 5%	10996	11662	10014	10891	
181	Bailey MEE + 5%	12245	8379	8503	9709	
182	Bailey MEE + 5%	8493	8355	8489	8446	
155	Bailey AG + 0,2	8419	7650	8281	8117	8239
156	Bailey AG + 0,2	6881	7579	7923	7461	
159	Bailey AG + 0,2	9108	8478	9233	8940	
160	Bailey AG + 0,2	8905	8448	8027	8460	
161	Bailey AG + 0,2	7699	7414	7120	7411	
162	Bailey AG + 0,2	8422	6830	7542	7598	

Tabela B.3 – Resultados do ensaio de Creep Estático para todos os corpos de prova estudados

Corpo de Prova	Mistura	Deformação Plástica Máxima (mm)	Deformação Plástica Específica Máxima	Média	Deformação Plástica Final (mm)	Deformação Plástica Específica Final	Média
93	Tradicional	0,1080	0,002298	0,00265	0,0890	0,001894	0,00211
94	Tradicional	0,1360	0,002894		0,1020	0,002170	
95	Tradicional	0,1290	0,002744		0,1070	0,002277	
118	Bailey	0,0890	0,001894	0,00146	0,0810	0,001723	0,00130
110	Bailey	0,0480	0,001021		0,0410	0,000872	
120*	Bailey						
190	Bailey MEE + 5%	0,1200	0,002553	0,00243	0,1080	0,002298	0,00210
191	Bailey MEE + 5%	0,1110	0,002362		0,0930	0,001979	
192	Bailey MEE + 5%	0,1110	0,002362		0,0950	0,002021	
163	Bailey Ag + 0,2	0,0700	0,001489	0,00193	0,0460	0,000979	0,00160
164	Bailey Ag + 0,2	0,1020	0,002170		0,0930	0,001979	
165	Bailey Ag + 0,2	0,1000	0,002128		0,0860	0,001830	

## **ANEXO C – TABELAS DO MÉTODO BAILEY**

Este anexo contém as tabelas utilizadas para a obtenção das informações necessárias à utilização do Método Bailey. Cada tabela representa uma das misturas cujo esqueleto mineral foi dosado de acordo com o Método Bailey.

## Mistura Bailey

Classe do material	Agregado Graúdo		Agregado Miúdo
		Brita 1	Brita 0

Classe do material	Valor de dimensionamento	Especificação
		Massa específica escolhida de AG pela % da massa específica solta
Porcentagem desejada passando na 0,075mm	3,8	3,5 - 6,0

Classe do material	Mistura de agregado graúdo pelo volume		Mistura de agregado fino pelo volume	
		42	58	100
Massa específica combinada de todos os agregados (calculado)	% da mistura acima deve somar 100		% da mistura acima deve somar 100	
2,718	Massa espec. combinada de todos os agregados	2,718	Volume total de agreg. Graúdo (%)	52,6
			Volume total de agreg. Fino (%)	47,4

Peneiras (mm)	Propriedades dos agregados - Porcentagem passante acumulada				MISTURA CALCULADA
	19,0	78,61	100,00	100,00	
12,5	16,81	99,76	100,00	82,4	
9,5	2,60	76,25	100,00	72,6	
4,75	1,67	11,72	99,00	53,2	
2,36	2,30	3,00	66,00	34,3	
1,18	2,25	2,80	50,00	26,3	
0,60	2,20	2,70	37,00	19,7	
0,30	2,15	2,50	25,00	13,7	
0,15	0,90	2,00	13,00	7,3	
0,075	0,55	1,10	6,68	3,8	
Massa específica (g/cm³)	2,711	2,730	2,714		
Massa específica aparente (g/cm³)	2,668	2,623	2,586		
% absorção	0,597	1,497	1,326		
Massa específica solta (kg/m³)	1472	1453			
Massa específica compactada (kg/m³)	1621	1582	1893		
Massa específica escolhida (kg/m³)	1443	1424	1893		
Contribuição kg/m³	606	826	897		
Vazios %	19,7	27,7			
Total de vazios %	47,4				
Massa específica da mistura (kg/m³)	2329				
% pelo peso	26,0	35,5	38,5		
% de fino no material graúdo	0,6	1,1			
% total de finos no material graúdo	1,7				
% de graúdo no material fino			13,1		
% total de graúdos no material fino			13,1		
% ajustada	21,1	29,0	49,9		
% contribuinte passante na 0,075mm	0,1	0,3	3,3		
% final de fino			49,9		

RESULTADOS	%
AG#1	21,1
AG#2	29,0
AF#1	49,9
Filer	0,0

	Faixa	Média
Proporção de AG	0,71	0,60 - 0,75
Proporção de GAF	0,49	0,35 - 0,50
Proporção de FAF	0,52	0,35 - 0,50

Peneiras de Controle	mm
PCP	4,75
PCS	1,18
PCT	0,3
Meia Peneira - PM	9,5

<b>Mistura Bailey MEE + 5%</b>
--------------------------------

<b>Classe do material</b>	<b>Agregado Graúdo</b>		<b>Agregado Miúdo</b>
	Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra

	<b>Valor de dimensionamento</b>	<b>Especificação</b>
	98	95 - 105
	3,8	3,5 - 6,0

	<b>Mistura de agregado graúdo pelo volume</b>		<b>Mistura de agregado fino pelo volume</b>	
	40	60	100	
	% da mistura acima deve somar 100		% da mistura acima deve somar 100	
	2,718	2,718	52,6	47,4

Peneiras (mm)	Propriedades dos agregados - Porcentagem passante acumulada					<b>MISTURA CALCULADA</b>
19,0	78,61	100,00	100,00			95,4
12,5	16,81	99,76	100,00			82,1
9,5	2,60	76,25	100,00			71,5
4,75	1,67	11,72	99,00			50,2
2,36	2,30	3,00	66,00			32,2
1,18	2,25	2,80	50,00			24,7
0,60	2,20	2,70	37,00			18,6
0,30	2,15	2,50	25,00			12,9
0,15	0,90	2,00	13,00			6,9
0,075	0,55	1,10	6,68			3,6
Massa específica (g/cm³)	2,711	2,730	2,714			
Massa específica aparente (g/cm³)	2,668	2,623	2,586			
% absorção	0,597	1,497	1,326			
Massa específica solta (kg/m³)	1472	1453				
Massa específica compactada (kg/m³)	1621	1582	1893			
Massa específica escolhida (kg/m³)	1516	1497		1893		
Contribuição kg/m³	606	898		847		
Vazios %	17,6	27,1				
Total de vazios %	44,7					
Massa específica da mistura (kg/m³)			2351			
% pelo peso	25,5	38,2		36,0		
% de fino no material graúdo	0,6	1,1				
% total de finos no material graúdo	1,7					
% de graúdo no material fino				12,2		
% total de graúdos no material fino				12,2		
% ajustada	21,4	32,0		46,5		
% contribuinte passante na 0,075mm	0,1	0,4		3,1		
% final de fino				46,5		

RESULTADOS	%
AG#1	21,4
AG#2	32,0
AF#1	46,5
Filer	0,0

	Faixa	Média
Proporção de AG	0,75	0,60 - 0,75
Proporção de GAF	0,49	0,35 - 0,50
Proporção de FAF	0,52	0,35 - 0,50

Peneiras de Controle	mm
PCP	4,75
PCS	1,18
PCT	0,3
Meia Peneira - PM	9,5

## Mistura Bailey AG + 0,2

Classe do material	Agregado Graúdo		Agregado Miúdo	
	Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra	
			Valor de dimensionamento	Especificação
	Massa específica escolhida de AG pela % da massa específica solta		98	95 - 105
	Porcentagem desejada passando na 0,075mm		3,8	3,5 - 6,0
	Mistura de agregado graúdo pelo volume		Mistura de agregado fino pelo volume	
	41	59	100	
	% da mistura acima deve somar 100		% da mistura acima deve somar 100	
Massa específica combinada de todos os agregados (calculado)	100		100	
2,718	Massa espec. combinada de todos os agregados		Volume total de agreg. Graúdo (%)	52,6
	2,718		Volume total de agreg. Fino (%)	47,4

## MISTURA CALCULADA

Peneiras (mm)	Propriedades dos agregados - Porcentagem passante acumulada				MISTURA CALCULADA
19,0	78,61	100,00	100,00		95,6
12,5	16,81	99,76	100,00		82,8
9,5	2,60	76,25	100,00		73,0
4,75	1,67	11,72	99,00		53,3
2,36	2,30	3,00	66,00		34,3
1,18	2,25	2,80	50,00		26,3
0,60	2,20	2,70	37,00		19,8
0,30	2,15	2,50	25,00		13,7
0,15	0,90	2,00	13,00		7,3
0,075	0,55	1,10	6,68		3,8
Massa específica (g/cm³)	2,711	2,730	2,714		
Massa específica aparente (g/cm³)	2,668	2,623	2,586		
% absorção	0,597	1,497	1,326		
Massa específica solta (kg/m³)	1472	1453			
Massa específica compactada (kg/m³)	1621	1582	1893		
Massa específica escolhida (kg/m³)	1443	1424	1893		
Contribuição kg/m³	606	826	897		
Vazios %	19,7	27,7			
Total de vazios %	47,4				
Massa específica da mistura (kg/m³)	2329				
% pelo peso	25,4	36,1	38,5		
% de fino no material graúdo	0,6	1,1			
% total de finos no material graúdo	1,7				
% de graúdo no material fino			13,1		
% total de graúdos no material fino			13,1		
% ajustada	20,6	29,5	49,9		
% contribuinte passante na 0,075mm	0,1	0,3	3,3		
% final de fino			49,9		

RESULTADOS	%
AG#1	20,6
AG#2	29,5
AF#1	49,9
Filer	0,0

		Faixa	Média
Proporção de AG	0,73	0,60 - 0,75	0,68
Proporção de GAF	0,49	0,35 - 0,50	0,43
Proporção de FAF	0,52	0,35 - 0,50	0,43

Peneiras de Controle	mm
PCP	4,75
PCS	1,18
PCT	0,3
Meia Peneira - PM	9,5