

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**  
**CAMPUS I – CAMPINA GRANDE**  
**ÁREA GEOTÉCNICA**

**SOFTPAVE: ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA PARA O AUXÍLIO À  
DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS PELO MÉTODO SUPERPAVE**

Autor: Alan Barbosa Cavalcanti

**Dissertação Apresentada ao Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande/PB, como Parte dos Requisitos Necessários para Obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.**

Campina Grande – Paraíba

Maio de 2013

**ALAN BARBOSA CAVALCANTI**

**Dissertação Apresentada ao Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande/PB, como Parte dos Requisitos Necessários para Obtenção Do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.**

Área de Concentração – Geotécnica

Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues

Orientador

Campina Grande, Maio de 2013

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Autor:** Alan Barbosa Cavalcanti

**Título:** SOFTPAVE: ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA PARA O AUXÍLIO À DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS PELO MÉTODO SUPERPAVE

Dissertação defendida e aprovada em: \_\_/\_\_/\_\_\_\_

**Banca Examinadora**

**(Assinatura):**

---

**Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues (Orientador)**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – LEP/DEC/CTRN/UFCG**

**(Assinatura):**

---

**Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri (Examinador Externo)**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – EESC-USP**

**(Assinatura):**

---

**Prof(a). Dra. Ana Paula Furlan (Examinadora Externa)**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – EESC-USP**

**(Assinatura):**

---

**Prof(a). Dra. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena (Examinadora Interna)**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – LEP/DEC/CTRN/UFCG**

## DEDICATÓRIA

*A Deus, a meu pai Josenaldo Cavalcanti e a minha mãe Maria Dagmar, que foram o alicerce de toda minha educação ajudando na construção do meu caráter e mostrando que é com determinação, perseverança e sabedoria que conseguimos nossos objetivos.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado saúde e coragem suficiente para encarar todos os obstáculos destes 24 anos, que vieram sempre, por escolha minha, em grandes proporções.

A meu pai, meu ídolo e meu exemplo de vida, um homem digno e de caráter que sempre recorri com a certeza de que suas palavras seriam de grande valor para as minhas escolhas.

A minha mãe, meu porto seguro e a mulher que me ajudou por completo a ser o que eu sou hoje. Passamos por dificuldades mãe, mas o que me deixa mais feliz é saber que ao fim dessa dissertação tenho a senhora com a sua saúde de volta, rezei a Deus todos os dias por isso.

A John Kennedy Guedes Rodrigues, um visionário e um corajoso professor, que antes de tudo aceitou orientar um aluno precoce de Engenharia Civil e que com compreensão e muita sabedoria desenvolveu um aprendizado que se tornou significativo ao longo do tempo em que compartilhamos juntos.

A minha família, que sempre proporcionou momentos de alegria ajudando a fortalecer minha mente e fazendo com que eu encarasse sempre os trabalhos com sabedoria.

A minha tia Maria Luiza, que foi desde o início uma incentivadora dos meus estudos e ajudou de forma direta para que eu conseguisse minha formação educacional além de contribuir na minha formação como pessoa.

Ao colega Arimatéia, que com muita paciência me ajudou na compreensão dos conhecimentos que foram necessários nesta pesquisa, além de fornecer vários dados de trabalhos seu já consolidados.

Aos colegas de laboratório, Jadilson, Nildinho, Lêda, Daniel e Paulo que ajudaram no compartilhamento de informações e alegraram os momentos de descontrações.

Aos colegas de mestrado Giovanna, Dennyele, Ronaldo, Loredana, Fabrizio, Karine, Erizângela e Wilton, que sempre foram companheiros nas atividades realizadas juntos.

Aos colegas de graduação Lúguio (“o mago”), Antônio (“Toninho”), Deivid, Daniel (“tubulão”), Jonathan, Gilmar (“GilmaCAD”) e Tiago (“Papai Noel”), que “seguraram a barra” nas provas e projetos.

As minhas amigas Juliana, Karla e Gabriela, que foram as melhores vizinhas que alguém poderia ter e que participaram de momentos marcantes e importantes da minha vida.

Aos meus colegas Tiago, Kennedy, Crhistoff, Giácomo, Pordeus, Alan, Phabyus, Daniel, Pablo, Rodrigo e Diego, parceiros de ideias e aventuras.

Aos bons professores que tive durante toda minha vida, que personificaram minha consciência e estimularam minha vontade de melhorar, ao modo que formaram minhas opiniões.

Ao CNPq, pela bolsa concedida.

A todos que, de alguma forma, ajudaram na conclusão deste trabalho.

## R E S U M O

A medida que a Tecnologia da Informação (TI) evolui, as organizações acompanham esse crescimento e fazem uso dessa ferramenta integrando-as aos seus insumos e serviços, a exemplo do uso de softwares que automatizam seus processos. Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta computacional (Software) visando possibilitar uma análise sobre técnicas, materiais, critérios, normalizações, procedimentos, e resultados obtidos no projeto de Dosagem de Concretos Asfálticos pelo método SUPERPAVE. Para o desenvolvimento do programa SOFTPAVE foi utilizado o modelo de Prototipação visando fornecer aos usuários um aplicativo e uma interface com representação física dos principais aspectos do sistema de implementação da Dosagem. O SOFTPAVE consegue determinar, dentro dos critérios preconizados pelas normas brasileiras e americanas, o teor de ligante ideal para as misturas asfálticas projetadas de forma que possam atender as exigências no que se refere às propriedades mecânicas, a serem obtidas em laboratórios, e que tenham um desempenho satisfatório em campo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tecnologia, Software, Dosagem, SUPERPAVE, Concreto Asfáltico, Softpave.

## A B S T R A C T

As the Technology of Information (TI) develops, the companies follow up the growth and make use of this tool integrating it with their inputs and services, as example, the use of softwares that automate their processes. The following paper had as objective the development of a computational tool (software) order to enable an analysis of techniques, materials, criteria, normalizations, procedures and results obtained with the project of Dosage of Asphaltic Concrete through the method SUPERPAVE. In the development of the software SOFTPAVE the model of Prototipation was used to give the users an application and an interface with physical representation of the major aspects of the implementation system of the Dosage. It is possible to conclude that the SOFTPAVE is able to determinate, within the criteria recommended by Brazilian and American standards, the ideal proportion of binding agent for the asphaltic mixtures, designed to meet the requirements regarding mechanical properties, to be developed in research labs, and that present successful results in field.

**KEYWORDS:** Technology, Software, Dosage, Super pave, Asphaltic Concrete, Softpave.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação convencional de curvas granulométricas [Fonte: Bernucci et al. 2007].....	7
Figura 2.2 - Equipamento para ensaio de abrasão Los Angeles [Fonte: LEP/UAEC/UFCG] .....	8
Figura 2.3 - Classificação dos Cimentos Asfálticos [Fonte: Souza, 2012] .....	12
Figura 2.4 - Asfalto natural na ilha de Trinidad [Fonte: Silva, 2012] .....	12
Figura 2.5 - Representação gráfica da propriedade viscoelástica do asfalto [Fonte: Motta et. al., (1996)] .....	15
Figura 2.6 – Viscosímetro Saybolt Furol [LEP/DEC/UFCG] .....	16
Figura 2.7 – Viscosímetro Brookfields [Fonte: LEP/DEC/UFCG].....	17
Figura 2.8 – Layout da forma de compactação e da estrutura do Compactador Giratório Superpave (CGS) [Fonte: SILVA, 2011].....	22
Figura 2.9 - Granulometria de densidade máxima [Traduzido de ROBERT et al. 1996]. .....	23
Figura 2.10 – Curva de Fuller & Thompson para representação da distribuição dos tamanhos das partículas de agregados para misturas asfálticas .....	25
Figura 2.11 - Ilustração dos componentes das misturas asfálticas que definem suas proporções relativas [Fonte: Bernucci et al, 2007] .....	34
Figura 2.12 – Rice Test (ASTM D 2041/2000) [LEP/UAEC/UFCG].....	36
Figura 2.13 – Informações para a realização do ensaio de módulo de resiliência em corpos de prova submetidos à tração indireta por compressão diametral [Fonte: SILVA, 2011].....	38
Figura 2.14 – Informações para realização do ensaio de Módulo Dinâmico ( $E^*$ ) sob carregamento de tensão na compressão [Fonte: SILVA, 2011] .....	38
Figura 2.15 - Estágios existentes em um processo de fadiga. [Fonte: Bernucci et al. 2007].....	41
Figura 2.16 - Vida de Fadiga considerando diferentes faixas granulométricas [Fonte: CERVO, 2004].....	43
Figura 2.17 – Estado de tensões gerado durante o ensaio de tração por compressão diametral [Fonte: ROHDE (2007)] .....	44
Figura 2.18 – Informações para o ensaio de Lottman [Fonte: TANDON et al. (2003)]. .....	46
Figura 2.19 – Dissecador e bomba a vácuo utilizados na saturação dos corpos de prova [Fonte: LEP/UAEC/UFCG].....	46
Figura 2.20 - Modelo em Cascata [Fonte: Sommerville (2003)] .....	48
Figura 2.21 - Modelo de protótipo.....	49
Figura 2.22 - Modelo espiral [Fonte: Boehm (1998)] .....	50
Figura 2.23 –Tela com um exemplo de Programação Java .....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleos (CAP) [Fonte: Resolução ANP N° 19, 17 de Março de 2006].....	13
Tabela 2.2 - Pontos de controle de acordo com o tamanho máximo do agregado (SUPERPAVE). ....	24
Tabela 2.3 – Zona de restrição de acordo com o tamanho máximo do agregado (SUPERPAVE).....	24
Tabela 2.4 – Requisitos de testes para cada nível SUPERPAVE [fonte: Motta et al, (1996)] .....	27
Tabela 2.5 - Requisitos SUPERPAVE de angularidade de agregados graúdos.....	29
Tabela 2.6 - Requisitos SUPERPAVE de angularidade de agregados miúdos .....	30
Tabela 2.7 - Requisitos SUPERPAVE de partículas alongadas e chatas .....	30
Tabela 2.8 - Requisitos SUPERPAVE para o teor de argila .....	31
Tabela 2.9 - Valores mínimos dos VAM (SUPERPAVE) [Fonte: Motta et al 1996] .....	32
Tabela 2.10 – Faixa de valores de RBV (SUPERPAVE) [Fonte: Asphalt Institute (2001)]. .....	32
Tabela 2.11 - Requisitos SUPERPAVE para %Gmm [Fonte: AASHTO MP2 (2001)] .....	33

## LISTA DE TELAS

Tela 1 – Interface principal.....	59
Tela 2 – “Menu” .....	60
Tela 3 – Apresentação do software .....	61
Tela 4 – Abertura ou criação de novo projeto .....	61
Tela 5 – Iniciando um novo projeto .....	62
Tela 6 – Inserção de dados básicos .....	62
Tela 7 – Escolha da faixa de trabalho, tráfego e espessura do pavimento .....	63
Tela 8 – Inserção de agregados graúdos .....	63
Tela 9 – Tabela e curva granulométrica do agregado graúdo .....	64
Tela 10 – Propriedades físicas do agregado graúdo .....	64
Tela 11 – Propriedade mecânica para o agregado graúdo.....	65
Tela 12 – Inserção de novo agregado graúdo .....	65
Tela 13 – Inserção de agregados miúdos.....	66
Tela 14 – Tabela e curva granulométrica do agregado miúdo.....	66
Tela 15 – Propriedades físicas do agregado miúdo.....	67
Tela 16 – Granulometria e propriedades físicas do filer .....	67
Tela 17 – Granulometria e propriedades físicas do filer .....	68
Tela 18 – Inserção de dados característicos do CAP .....	68
Tela 19 – Dados do CAP virgem e envelhecido .....	69
Tela 20 – Valores para BBR .....	69
Tela 21 – Viscosidades Brookfield e Saybolt Furol.....	70
Tela 22 – Resumo das informações da etapa de Dados do Projeto.....	70
Tela 23 – Resumo das informações iniciais.....	71
Tela 24 – Resumo dos dados de agregado graúdo e miúdo .....	71
Tela 25 – Resumo dos dados do filer e do CAP .....	71
Tela 26 – Granulometria dos materiais utilizados no projeto da mistura: curva convencional.....	72
Tela 27 – Confirmação das composições granulométricas .....	72
Tela 28 – Confirmação de configuração para uma curva inferior .....	73
Tela 29 – Tabela granulométrica .....	73
Tela 30 – Curva de Fuller .....	74
Tela 31 – Tabela granulométrica da curva inferior.....	74
Tela 32 – Curva de Fuller para configuração inferior.....	75
Tela 33 – Tabela granulométrica completa da curva inferior .....	75
Tela 34 – Curva de Fuller para configuração inferior com a curva de Projeto Real.....	76
Tela 35 – Tabela granulométrica completa da curva intermediária .....	76

Tela 36 – Curva de Fuller para configuração intermediária com a curva de Projeto Real .....	77
Tela 37 – Tabela granulométrica completa da curva superior .....	77
Tela 38 – Curva de Fuller para configuração superior com a curva de Projeto Real.....	77
Tela 39 – Tela final da etapa de análise granulométrica. ....	78
Tela 40 – Quadro Resumo da etapa de composição granulométrica .....	78
Tela 41 – Tabelas de porcentagens Teóricas e Reais.....	79
Tela 42 – Gráfico da curva inferior e tabela comparativa do projeto real e teórico.....	79
Tela 43 – Gráfico da curva intermediária e tabela comparativa do projeto real e teórico .....	80
Tela 44 – Gráfico da curva superior e tabela comparativa do projeto real e teórico.....	80
Tela 45 – Confirmação da etapa de composição granulométrica.....	81
Tela 46 – Modificação da DMT calculada por DMT do Rice Test.....	81
Tela 47 – Mudança da DMT .....	82
Tela 48 – Estimativa do teor de ligante inicial.....	82
Tela 49 – Escolha do tipo de tráfego .....	83
Tela 50 – Confirmação dos números de giros do compactador CGS.....	83
Tela 51 – Moldagem preliminar .....	84
Tela 52 – Detalhamento da moldagem preliminar .....	84
Tela 53 – Informações da compactação dos corpos de prova referidos.....	85
Tela 54 – Calculo dos parâmetros dos corpos de prova referidos.....	86
Tela 55 – Sucesso ao inserir informações de compactação.....	87
Tela 56 – Moldagem preliminar da curva intermediária .....	87
Tela 57 – Moldagem preliminar da curva superior.....	88
Tela 58 – Escolha da mistura teste.....	88
Tela 59 – Detalhamento da tabela de escolha da mistura teste .....	89
Tela 60 – Confirmação da curvada mistura teste escolhida .....	89
Tela 61 – Moldagem da mistura teste.....	90
Tela 62 – Moldagem da mistura teste (teor estimado).....	90
Tela 63 – Moldagem da mistura teste (teor estimado - 0,5%) .....	91
Tela 64 – Moldagem da mistura teste (teor estimado + 0,5%) .....	91
Tela 65 – Moldagem da mistura teste (teor estimado + 1%) .....	92
Tela 66 – Tabela de critérios resumidos.....	92
Tela 67 – Detalhamento da tabela de critérios resumidos.....	93
Tela 68 – Teor de ótimo de ligante .....	93
Tela 69 – Gráfico e valor do teor ótimo de ligante .....	94
Tela 70 – Gráfico e valor do VAM.....	94
Tela 71 – Gráfico e valor da RBV .....	95
Tela 72 – Teste para os critérios SUPERPAVE.....	95

Tela 73 – Visualização e cálculo das propriedades mecânicas dos corpos de prova da mistura final .....	96
Tela 74 – Propriedades mecânicas que podem ser inseridas no software.....	96
Tela 75 – Primeira página do relatório final .....	97

## LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 3.1 - Sequência de atividades realizadas na fase experimental do desenvolvimento da ferramenta	55
Fluxograma 3.2 - Fase I: sequência de atividades (Análise dos dados de Entrada) .....	55
Fluxograma 3.3 - Fase II: sequência de atividades (Análise Granulométrica).....	56
Fluxograma 3.4 - Fase III: sequência de atividades (Ligante) .....	57

## LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO	American Association Of State Highway And Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADP	Asfaltos Diluídos de Petróleo
ASTM	American Society for Testing and Material
BBR	Bending Bean Rheometer
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	Índice de Suporte Califórnia
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CEASF	Clube dos Engenheiros do Alto São Francisco
CGS	Compactador Giratório Superpave
cP	Centipoise
CPA	Camada Porosa de Atrito
DC	Deformação Controlada
DEC	Departamento de Engenharia Civil
DMT	Massa Especifica Teórica das Misturas Asfálticas
DNIT	Departamento Nacional de Infra-estrutura e Transporte
DOTs	Departamentos de Transportes dos Estados Unidos
DSR	Dynamic Shear Rheometer
DTT	Direct Tension Tester
$ E^* $	Módulo Dinâmico
$E^*$	Módulo Complexo
ESAL	Equivalent Simple Axle Loads
EUA	Estados Unidos da América
$G^*$	Módulo Complexo Cisalhante

$G_{mm}$	Massa Específica Máxima Medida
$G_{sb}$	Massa Específica Aparente
HMA	Hot Mix Asphalt
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis
IDT	Indirect Tensile Tester
JDK	Java Development Kit
JIT	Just In Time
LUBNOR	Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste
$M_R$	Módulo de Resiliência
N	Números de Ciclos de Carregamento
NBR	Norma Brasileira Registrada
$N_{ini}$	Esforço de Compactação Inicial
$N_{max}$	Esforço de Compactação Máximo
$N_{projeto}$	Esforço de Compactação de Projeto
PAV	Pressure Aging Vessel
$P_{be}$	Teor Efetivo de Asfalto
PDF	Portable Document Format
PG	Performance Grade
RBV	Relação Asfalto Vazios
RRT	Relação da Resistência à Tração
RT	Resistência à Tração
RTFO	Rolling Thin Film Oven
RV	Rotational Viscometer
SGC	SUPERPAVE Giratory Compactor
SHRP	Strategic Highway Research Program
SMA	Stone Matrix Asphalt



SST	SUPERPAVE Shear Tester
SUPERPAVE	SUperior PERforming Asphalt PAVEments
TC	Tensão Controlada
TF	Teor de Filer
TI	Tecnologia da Informação
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
Va	Volume De Vazios
VAM	Vazios do Agregado Mineral
XP	Extreme Programming
ZR	Zona de Restrição
$\delta$	Ângulo de Fase
$\epsilon_t$	Deformação de Tração
$\sigma_t$	Tensão de Tração

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	OBJETIVOS .....	3
1.1.1	Geral .....	3
1.1.2	Específicos.....	3
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	3
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	5
2.1	INTRODUÇÃO .....	5
2.2	AGREGADOS MINERAIS.....	6
2.2.1	Classificação dos Agregados Minerais .....	6
2.2.2	Propriedades Físicas e Mecânicas de Agregados .....	8
2.3	CIMENTOS ASFÁLTICOS DE PETRÓLEO (CAP) .....	9
2.3.1	Tipos de Cimentos Asfálticos.....	11
2.3.2	Composição Química dos Cimentos Asfálticos .....	13
2.3.3	Susceptibilidade à Temperatura e Oxidação .....	14
2.4	COMPOSIÇÕES DE MISTURAS ASFÁLTICAS .....	17
2.4.1	Compactação de Misturas Asfálticas .....	20
2.5	DOSAGEM SUPERPAVE .....	22
2.5.1	Seleção do Ligante .....	27
2.5.2	Seleção dos Agregados .....	28
2.5.3	Requisitos Volumétricos da Dosagem SUPERPAVE .....	31
2.6	PROPRIEDADES DAS MISTURAS ASFÁLTICAS .....	33
2.6.1	Propriedades de Estado de uma Mistura Asfáltica .....	34
2.7	PARÂMETROS RELEVANTES DE MISTURAS ASFÁLTICAS PARA A PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA .....	36
2.7.1	Módulo de Resiliência.....	36
2.7.2	Módulo Complexo .....	39
2.7.3	Ensaio de Vida de Fadiga.....	40
2.7.4	Ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral .....	43
2.7.5	Ensaio de Lottman Modificado.....	44
2.8	ENGENHARIA DE SOFTWARE .....	46
2.8.1	Processos de desenvolvimento de software .....	47
2.8.2	Modelos de desenvolvimento de software .....	48
2.9	PROGRAMAÇÃO JAVA.....	51
3.	METODOLOGIA.....	54
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	58
4.1	APRESENTAÇÃO DA INTERFACE.....	59

4.2	EXEMPLO DE UM PROJETO DE DOSAGEM SUPERPAVE “PASSO A PASSO” .....	60
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA AS FUTURAS PESQUISAS.....	98
5.1	CONCLUSÕES .....	98
5.2	SUGESTÕES PARA AS FUTURAS PESQUISAS.....	99
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	100

# CAPÍTULO 1

---

## 1. INTRODUÇÃO

A informação passou a ser primordial para a sobrevivência das organizações e, por consequência, as ferramentas de Tecnologia da Informação (TI) estão cada vez mais integradas aos negócios, sempre buscando eficiência e eficácia e aumento da competitividade. As soluções de TI permitem às organizações acompanhar a velocidade da disponibilização de informações e, por isso, as empresas estão cada vez mais integrando essas ferramentas em suas atividades diárias. Do gerenciamento de atividades até o desenvolvimento de seus produtos, a utilização de ferramentas de TI torna-se essencial para sobrevivência das organizações (SILVA et al., 2009).

Os softwares são partes importantes para a criação dos sistemas de automação, palavra chave para suprir as necessidades de produção, responsáveis pela rapidez e agilidade dos processos. Segundo Rocha (1998) o surgimento de máquinas com maior capacidade de processamento e armazenamento de informações possibilitou a substituição de mão-de-obra por equipamento, ao mesmo tempo em que permitiu a utilização de linguagens de mais alto nível, oferecendo suporte para o desenvolvimento do mercado de softwares.

A necessidade em investimentos rodoviários, com o objetivo de melhorar a logística que movimenta o comércio interno e os grandes empreendimentos brasileiros, impulsiona as empresas distribuidoras de asfalto que por sua vez são estimuladas a aumentar a qualidade de seus produtos, no que se diz respeito ao uso de novos materiais e tecnologias. Na Sociedade da Informação, a universidade passa a ter um importante papel, transferindo os grandes insumos dessa sociedade, ou seja, os conhecimentos científico e tecnológico, para o setor produtivo, gerando serviços e agregando valor aos produtos.

Entre os anos de 1987 e 1993, o Strategic Highway Research Program (SHRP), com o aval do Congresso dos Estados Unidos, investiu US\$ 150 milhões em uma grande pesquisa com o objetivo de melhorar a qualidade e a durabilidade dos revestimentos produzidos no país. Dessa pesquisa nasce um novo sistema de pavimentação asfáltica denominado SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements – Pavimentos Asfálticos de Desenvolvimento Superior). Portanto, o termo “SUPERPAVE” representa um sistema capaz de especificar materiais, projetar e analisar misturas asfálticas, e prever desempenho de revestimentos.

Nos revestimentos asfálticos, aplicados em rodovias brasileiras, tem sido comum a ocorrência de problemas associados à mecanismos de deteriorização como deformação permanente e fadiga. O que agrava a

situação é que este tipo de defeito costuma se manifestar de maneira precoce, comprometendo a serventia dos pavimentos em poucas semanas (Nascimento et al., 2008). Para combater este tipo de defeito em misturas asfálticas é importante utilizar agregados com propriedades específicas. Uma das características da metodologia de dosagem SUPERPAVE é a preocupação com o ligante utilizado nas misturas asfálticas e a importância atribuída à distribuição granulométrica, oferecendo especificações que a torna uma dosagem complexa do ponto de vista de sua aplicabilidade, essa complexidade se dá pelo fato dessa metodologia aplicar maior controle aos valores exigidos por norma e, também, a sua pouca utilização no Brasil.

Tendo em vista a necessidade de automatizar o processo SUPERPAVE, diminuindo sua complexidade, além de atribuir a essa metodologia o uso dos materiais utilizados para dosagem no Brasil, bem como criando um repositório de dados, é possível a implementação de uma ferramenta do tipo software aplicativo para esse fim que contenha todos os dados para dosagem de misturas asfálticas utilizando a metodologia SUPERPAVE, desde a caracterização dos materiais até a avaliação das misturas realizadas.

A ferramenta a ser criada ficaria a disposição do Laboratório de Engenharia de Pavimentos e Infraestrutura da UFCG, oferecendo auxílio aos técnicos laboratoristas e possíveis usuários do mesmo. Como esse tipo de aplicativo modela matematicamente e automaticamente os dados de entrada de acordo com a metodologia SUPERPAVE, é possível tirar a responsabilidade de resoluções matemáticas e traçado de gráficos da mão dos técnicos laboratoristas tendo em vista que alguns gráficos e modelos matemáticos referentes a ao ensaio não são triviais, essa possibilidade diminuiria o número de erros que podem ser gerados nesse tipo de atividade.

Além do mais é de bastante valia a comercialização da ferramenta com empresas que contém laboratórios especializados em pavimentação e que procuram por métodos que automatizem seus trabalhos. O aplicativo ajuda na busca pela qualidade já que esta é essencial para a atuação no mercado de obras rodoviárias, sendo uma exigência de muitos órgãos públicos que regulam este mercado.

Portanto, nesta pesquisa será apresentado o conjunto de passos que foi seguido para desenvolvimento do software, desde a sua concepção lógica, passando pelos conhecimentos adquiridos, desenvolvimento propriamente dito da ferramenta e aplicação de testes de dosagens a fim de detectar erros e possíveis modificações que possam ser feitas visando uma melhor facilidade de uso do software.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Geral**

Desenvolver uma ferramenta computacional (Software) visando possibilitar uma análise sobre técnicas, materiais, critérios, normalizações, procedimentos, e resultados obtidos no projeto de Dosagem de Concretos Asfálticos pelo método SUPERPAVE utilizados no Brasil e nos Estados Unidos.

### **1.1.2 Específicos**

- facilitar a Dosagem SUPERPAVE, bem como integrar na mesma a utilização das especificações normativas existentes no Brasil, tendo em vista que esta metodologia é Norte Americana;

- criar um banco de dados com resultados dos ensaios realizados visando uma fácil recuperação de informações;

- utilizar esta ferramenta durante as aulas experimentais que utilizam o ensaio SUPERPAVE no curso de Engenharia Civil, dar suporte, também, a pesquisas de iniciação científica e pós-graduação na elaboração do ensaio, bem como a possível disponibilização da ferramenta para o mercado de dosagem de misturas asfálticas.

- automação dos cálculos realizados na Dosagem SUPERPAVE;

- difundir a dosagem SUPERPAVE no Brasil.

## **1.2 Organização do trabalho**

O texto desta dissertação encontra-se em um volume distribuído da seguinte forma:

[Capítulo 1] Introdução – são descritos uma visão geral do trabalho com a introdução, justificativa, os objetivos a serem alcançados e a forma da organização do trabalho.

[Capítulo 2] Fundamentação Teórica – são descritos e discutidos assuntos relacionados aos Revestimentos Asfálticos, Agregados Minerais, Cimento Asfáltico de Petróleo, Dosagens de Misturas Asfálticas, etc.

[Capítulo 3] Materiais e Métodos – são descritos os procedimentos e materiais utilizados na pesquisa inerentes à metodologia científica do trabalho.

[Capítulo 4] Resultados – são analisados com base na fundamentação teórica e nos resultados obtidos durante a fase experimental.

[Capítulo 5] Conclusões e Sugestões – são redigidos os resultados e argumentações referente aos resultados inerentes ao objetivo do trabalho, bem como as sugestões para futuras pesquisas.

Por fim, estão incluídos as Referências Bibliográficas e os Anexos, onde foram inseridas as planilhas, os gráficos e os quadros resultantes do processamento de dados.

# CAPÍTULO 2

---

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Introdução

Na estrutura do pavimento o revestimento é a camada responsável por receber a ação do clima e o esforço provocado pelas cargas dos veículos. De acordo com Bernucci et. al (2006), essa camada deve ser tanto quanto possível impermeável e resistente aos esforços de contato pneu-pavimento em movimento, que são variados conforme a carga e a velocidade dos veículos.

O revestimento é composto de um conjunto de materiais: agregado mineral e o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). O agregado mineral tem a função de formar um sistema resistente ao impacto e o CAP funciona como um cimento que de acordo com Motta et. al (1996), atua como um elemento de ligação, colando as partículas minerais, formando uma massa coesa. Os autores reforçam que essa Mistura Asfáltica pode ser constituída de um CAP modificado, que por sua vez também atua como um agente impermeabilizante da mistura e que o comportamento da mistura é afetado tanto pelas propriedades de seus componentes individuais, quanto pela relação entre eles.

A seguir serão descritos, sucintamente, os procedimentos utilizados para o estudo das propriedades físicas, de estado e mecânicas de materiais e de misturas utilizadas para a produção de Concretos Asfálticos também denominados Misturas Asfálticas ou Concreto Betuminoso. Doravante, neste trabalho iremos utilizar o termo Mistura Asfáltica para denominar a composição de CAP+Agregados+Filer.

Os temas abordados na Fundamentação Teórica – Agregados Minerais, Cimentos Asfálticos De Petróleo (CAP), Composições de Misturas Asfálticas, Dosagem SUPERPAVE, Propriedades das Misturas Asfálticas, Parâmetros de Misturas Asfálticas Relevantes para a Pavimentação Asfáltica, Engenharia de Software e Programação Java – foram de extrema relevância para o estabelecimento e o desenvolvimento dos procedimentos relacionados aos critérios e aos métodos utilizados na elaboração do software objetivo desta pesquisa.



## 2.2 Agregados Minerais

Na dosagem de um revestimento asfáltico, além do CAP, existe o agregado mineral, que por sua vez deve ser bem selecionado para que a estrutura seja durável. Para o engenheiro selecionar esse material é importante o conhecimento das propriedades do mesmo. De acordo com a norma da ABNT NBR 9935/2005, que contém as terminologias dos agregados, “o termo agregado é definido como material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e de concreto”.

### 2.2.1 Classificação dos Agregados Minerais

Dentre as classificações dos agregados para o uso em misturas asfálticas, é importante saber classificá-los quanto ao tamanho: gráudo, miúdo e material de enchimento ou filer. Agregado gráudo é o material com dimensões maiores do que 2,0mm, ou seja, retido na peneira nº 10. Agregado miúdo é o material com dimensões maiores que 0,075mm e menores que 2,0mm, é retido na peneira de nº 200, mas que passa na de abertura nº 10. Material de enchimento (filer) é aquele onde pelo menos 65% das partículas é menor que 0,075mm, correspondente à peneira de nº 200. De acordo com a norma DNIT 031/2006 – ES são exemplos de agregado gráudo: pedra britada, escória ou seixo rolado preferencialmente britado ou outro material indicado nas Especificações Complementares, de agregado miúdo: areia, pó-de-pedra ou mistura de ambos ou outro material indicado nas Especificações Complementares, de filer: cimento Portland, cal extinta, pós-calcários, cinza volante, etc, de acordo com a Norma DNER-EM 367.

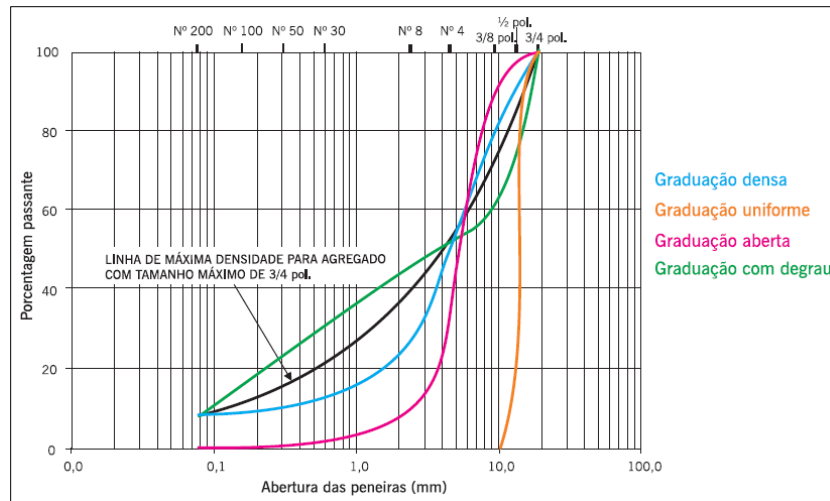
O conhecimento acerca da distribuição granulométrica dos agregados é muito importante para a composição da mistura asfáltica. Para Bernucci et. al (2006) em misturas asfálticas a distribuição granulométrica do agregado influencia quase todas as propriedades importantes incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida, etc.

Os ensaios responsáveis para determinação da granulometria dos agregados são: o ensaio de granulometria por peneiramento – DNIT (2006), DNIT – ME 080/94 – e por sedimentação – DNIT (2006), DNIT – ME051/94. O ensaio de peneiramento é realizado para as partículas de solo maiores que 0,075mm (peneira nº 200 da ASTM). Esse ensaio é feito passando uma amostra do solo por uma série de peneiras de malhas quadradas de dimensões padronizadas. Pesam-se as quantidades retidas em cada peneira e calculam-se as porcentagens que passam em cada peneira.

Quanto à granulometria mais fina, passante na peneira nº 200, emprega-se a técnica de sedimentação, que se baseia na lei de Stokes: a velocidade de queda de partículas esféricas num fluido atinge um valor limite

que depende do peso específico do material da esfera, do peso específico do fluido, da viscosidade do fluido e do diâmetro da esfera.

Depois da realização dos ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação é possível traçar a curva granulométrica em um diagrama semi-logarítmico (Figura 2.1), que tem como abscissa os logaritmos das dimensões das partículas e, como ordenadas as porcentagens, em peso, de material que tem dimensão média menor que a dimensão considerada (porcentagem do material que passa).



**Figura 2.1 - Representação convencional de curvas granulométricas [Fonte: Bernucci et al. 2007]**

Uma característica importante do agregado mineral está relacionada com o seu tamanho máximo pois este pode provocar mudanças no comportamento da mistura asfáltica. De acordo com Bernucci et. al (2006), pode tornar instáveis as misturas asfálticas com agregados de tamanho máximo excessivamente pequeno e prejudicar a trabalhabilidade e/ou provocar segregação em misturas asfálticas com agregados de tamanho máximo excessivamente grande. Os autores citam a norma ASTM C 125 definindo o tamanho máximo do agregado em uma de duas formas:

- Tamanho máximo: *é a menor abertura de malha de peneira através da qual passam 100% das partículas da amostra de agregado;*

- Tamanho nominal máximo: *é a maior abertura de malha de peneira que retém não mais de 10% em peso.* Na metodologia SUPERPAVE (Superior Performing Pavements Asphalt) o tamanho nominal máximo é definido como a abertura de malha de peneira imediatamente maior a da primeira peneira a reter mais de 10% do material.

## 2.2.2 Propriedades Físicas e Mecânicas de Agregados

Em Misturas Asfálticas é de extrema importância o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas dos agregados, que por sua vez têm relação direta com a rocha de origem.

### Resistência à Abrasão

Para verificação da resistência à abrasão é realizado o ensaio de abrasão, seja à quebra, à degradação ou à desintegração (DNIT ME-035/98 e ABNT NBR NM 51/2001). O ensaio é realizado em um equipamento chamado de “Los Angeles” (Figura 2.2), onde uma amostra de agregados é colocada junto com uma carga abrasiva, composta por esferas de aço, e esse conjunto é submetido a revoluções que podem variar de 30 a 33 RPM. O valor da Abrasão *Los Angeles* é expresso pela porcentagem, em peso, do material que passa, após ensaio, pela peneira de malhas quadradas de nº 12 (1,7mm) em relação à massa inicial. O valor do desgaste Los Angeles deve ser inferior ou igual a 50%, admitindo-se excepcionalmente agregados com valores maiores, no caso de terem apresentado comprovadamente desempenho satisfatório em utilização anterior (DNIT 031/2006 – ES).

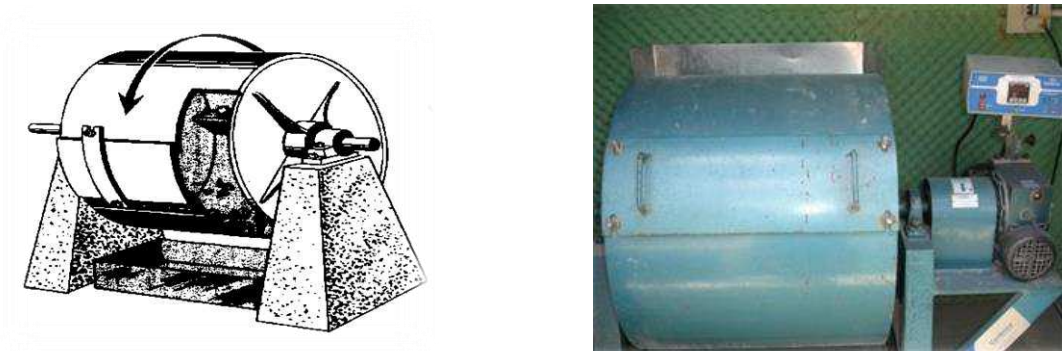


Figura 2.2 - Equipamento para ensaio de abrasão Los Angeles [Fonte: LEP/UAEC/UFCG]

Outra característica importante do agregado britado é a sua porosidade que influencia diretamente na quantidade de CAP que o mesmo poderá absorver, modificando, assim, as propriedades de uma mistura asfáltica.

### Absorção

De acordo com a DNIT-ME 081/98 a absorção é o aumento da massa de agregado, devido ao preenchimento por água de seus vazios permeáveis, expresso como porcentagem de sua massa seca. A massa de água é absorvida após 24 horas de imersão do agregado à temperatura ambiente, sendo determinada para permitir o cálculo das massas específicas, real e aparente, do agregado.

Para Bernucci et. al (2006) um agregado ao absorver CAP irá consumir parte do CAP necessário para dar coesão a uma mistura asfáltica. Para compensar esse fato, deve-se incorporar à mistura asfáltica uma quantidade adicional de CAP.

Agregados naturais ou britados com elevada porosidade normalmente não devem ser utilizados em misturas asfálticas, pois além de consumirem maior quantidade de CAP asfáltico, podem apresentar porosidade variável conforme a amostragem, o que dificulta o estabelecimento do teor de CAP, podendo resultar em excesso ou falta do mesmo. Porém, nem sempre há outro agregado disponível, sendo então necessários alguns cuidados na dosagem (BERNUCCI et al., 2006).

### **Sanidade**

De acordo com Motta et. al (1996), é porcentagem de material perdido de uma mistura de agregado durante o tratamento com sulfato de sódio ou magnésio. Bernucci et. al (2006) diz que alguns agregados que inicialmente apresentam boas características de resistência podem sofrer processos de desintegração química quando expostos às condições ambientais no pavimento. Determinados basaltos, por exemplo, são susceptíveis à deterioração química com formação de argilas.

A sanidade é medida pelo método AASHTO T 104-93 ou ASTM C 88-99 “Sanidade de Agregados usando o Sulfato de Sódio ou Magnésio”, servindo para estimar a resistência ao intemperismo do agregado. Os valores máximos de perda variam de até 20% para ensaios executados com sulfato de sódio e até 30% para ensaios executados com sulfato de magnésio. No Brasil a especificação para Mistura Asfáltica DNIT ES 313/97 limita este valor em no máximo 12%.

### **Materiais deletérios**

De acordo com Marques (2004) são definidos como a porcentagem em peso de contaminantes misturados ao agregado graúdo ou miúdo, contaminantes tais como xisto, madeira, mica e carvão. É medida pelo ensaio AASHTO T 112-93 ou ASTM C 142-97 “Torrões de Argila e Partículas friáveis em Agregados”. Os limites para este parâmetro dependem da composição exata dos contaminantes e pode variar de 0,2 a 10%. O teste é realizado peneirando frações úmidas de agregados em conjunto.

## **2.3 Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP)**

O registro mais antigo do uso pelo homem de asfalto é de 180.000 anos atrás em El Kowm Basin na Síria, no qual o asfalto natural era usado para grudar/unir utensílios a pedras e ferramentas para gerar faísca e conseqüentemente controlar o fogo (LESJEUR, 2009). Os materiais asfálticos foram utilizados na antiguidade

como aglutinante e impermeabilizante. Há registros antigos do uso de asfalto, na mumificação pelos egípcios e na impermeabilização de reservatórios de água pelos mesopotâmios (IBP, 1999).

Outro registro da manipulação de asfalto é do século XVII, quando Niepce, um egiptologista amador, descobriu que o asfalto Sírio, também conhecido como asfalto da Judéia, era sensível à luz solar (MOTHÉ, 1981).

O primeiro registro do uso de asfalto para pavimentação aconteceu no século XVII. A aplicação de asfaltos naturais provenientes de jazidas para a pavimentação ocorreu em 1802 na França; em 1838 nos Estados Unidos e em 1869 na Inglaterra. Apenas em 1909 que o asfalto passou a ser obtido a partir do petróleo (IBP, 1999). A França, sem dúvida, foi um dos países que mais investiu na modernização na área da construção civil, visto sua preocupação em pavimentos de boa qualidade sempre observando conceitos como: as erosões do solo; a compactação das camadas do pavimento, a drenagem e o abaulamento na superfície da estrada, entre outras (BERNUCCI et al. 2006).

No Brasil, a primeira estrada construída foi em 1560 e ligava São Vicente a Piratininga. No estado de São Paulo, no século XVIII, iniciava-se o uso de concreto em pavimentos nos trechos mais íngremes da “Estrada do Mar”, cuja construção teve início em 1837 e recuperada em 1922. Em 1860 a Estrada de Rodagem União Indústria, hoje parte da BR-040/RJ, foi a primeira a utilizar macadame<sup>1</sup> como base de revestimento, substituindo as pedras importadas de Portugal.

Três fatos foram cruciais para o avanço do setor rodoviário brasileiro e da pavimentação de revestimentos asfálticos: a criação do Fundo Rodoviário Nacional em 1946, a criação da Petrobras em 1953 e a construção da primeira fábrica de asfalto da Refinaria Presidente Bernardes da Petrobrás, em 1955, chegando a produzir 116.000 t/ano de asfalto.

No ano de 2008 foram comercializadas no Brasil 2.168.922 toneladas e exportadas 22.138 toneladas de asfaltos pela Petrobrás. A LUBNOR, unidade da Petrobrás em Fortaleza-CE, registrou em 2008 com as vendas de asfaltos (CAP e ADPs), a comercialização de 218.508 toneladas. O recorde anterior era do ano de 2002, quando foram comercializadas 216.517 toneladas. Só no mês de setembro de 2008, a produção foi de 26.808 toneladas (CEASF, 2009). A LUBNOR, refinaria de petróleo da Petrobrás localizada no estado do Ceará, conquistou em 2009, o recorde histórico anual de vendas de asfaltos, alcançando a marca de 242.904 toneladas vendidas. Esse recorde representa um incremento nas vendas de 11% em relação ao ano anterior e de mais de 49% quando comparado a média dos últimos 15 anos.

<sup>1</sup> Macadame foi um dos materiais mais empregados nas primeiras rodovias brasileiras, com base na experiência inglesa de McAdam do início do século XIX. Trata-se de uma camada granular, composta por agregados graúdos, naturais ou britados, cujos vazios são preenchidos em pista por agregados miúdos e aglutinados pela água, no caso específico do macadame hidráulico.

### 2.3.1 Tipos de Cimentos Asfálticos

De acordo com a Norma Européia EN 12591:2009, asfalto é definido como um material à prova d'água, aglutinante, completamente solúvel em tolueno, muito viscoso, possui um comportamento semelhante ao sólido a temperatura ambiente, podendo ser obtido pelo refino do óleo cru ou estar presente na natureza.

Os Cimentos Asfálticos possuem três grandes divisões: Cimento Asfáltico Natural (asfalto natural), Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e os de origem do Alcatrão. Na Figura 2.3, observa-se um fluxograma com as divisões e subdivisões destes aglutinantes.

Os Cimentos Asfálticos Naturais são depósitos formados pelo petróleo que surgem na superfície da terra e sofrem uma destilação natural pela ação do vento e do sol, que retiram os gases e óleos leves, deixando um resíduo, que é o asfalto natural (GRECO, 2006). Por volta de 1595, *Sir Walter Raleigh*, em seus relatos de suas viagens mencionou a existência de um lago de asfalto natural na *Ilha de Trinidad* (Figura 2.4), no mar do Caribe (MILES & BRISTON, 1975), e até início do século XX este asfalto abasteceu todo o mercado americano de Cimentos Asfálticos usados em pavimentação. No entanto por ser um material muito duro, necessita ser misturado com Cimento Asfáltico de Petróleo para o uso em rodovias (IBP, 1999; WAPA, 2009).

O alcatrão é produzido pela queima de material orgânico como tabaco, madeira ou carvão. A maioria dos alcatrões utilizados na pavimentação são subprodutos da destilação destrutiva do carvão. O carvão é aquecido a 1000°C, produzindo o coque, que dá origem ao alcatrão bruto. O alcatrão produzido pela combustão do carvão é um material que deve ser refinado, produzindo um líquido com propriedades físicas semelhantes ao do cimento asfáltico, porém com propriedades químicas muito diferentes. Uma das utilizações remanescentes de alcatrão na pavimentação foi como selante, pois este material é insolúvel em derivados do petróleo (DNIT, 1996; IBP, 1999).

Na Tabela 2.1 estão contidas as especificações brasileiras para o cimento Asfáltico de Petróleo.

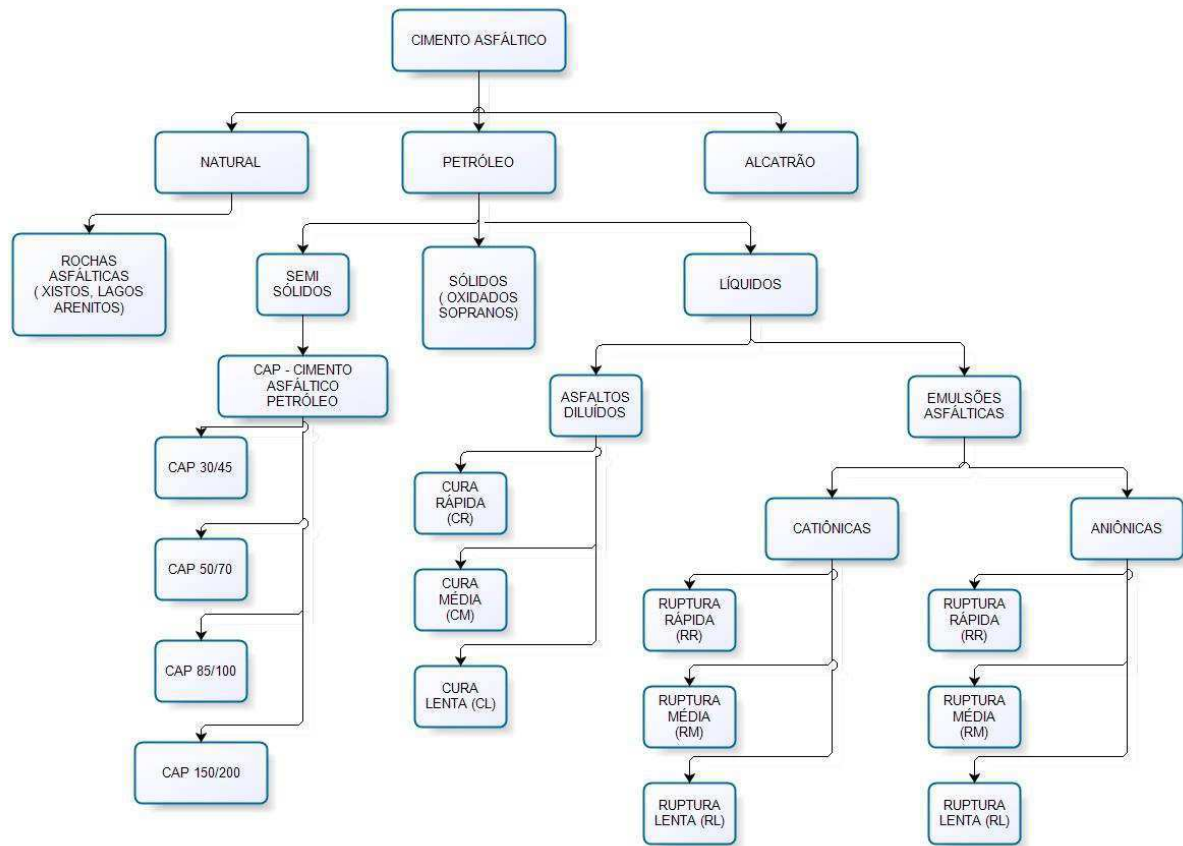


Figura 2.3 - Classificação dos Cimentos Asfálticos [Fonte: Souza, 2012]



(a)



(b)

Figura 2.4 - Asfalto natural na ilha de Trinidad [Fonte: Silva, 2012]

Tabela 2.1 - Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleos (CAP)

[Fonte: Resolução ANP N° 19, 17 de Março de 2006]

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP150-200	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25° C)	0,1 mm	3045	5070	85100	150200	NBR 6576	D 5
Ponto de Amolecimento, mín	° C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-Furol	s					NBR 14950	E 102
a 135 ° C, mín		192	141	110	80		
a 150 ° C, mín		90	50	43	36		
a 177 ° C, mín		40150	30150	1560	1560		
OU							
Viscosidade Brookfield	cp					NBR 15184	D4402
a 135 ° C, SP		374	274	214	155		
21, 20 rpm, mín							
a 150 ° C, SP		203	112	97	81		
21, mín							
a 177 ° C, SP 21		76285	57285	28114	28117		
Índice de susceptibilidade térmica (1)		(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)		
Ponto de fulgo, mín	° C	235	235	235	235		D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5		D 2042
Ductilidade a 25° C, mín	cm	60	60	100	100		D 113
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163° C, 85 mín							D2872
Varição em massa, máx (2)	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		
Ductilidade a 25° C, mín	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx	° C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín (3)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

### 2.3.2 Composição Química dos Cimentos Asfálticos

Os petróleos ou óleos crus diferem em suas propriedades físicas e químicas, variando de líquidos negros viscosos até líquidos castanhos bastante fluidos, com composição química predominantemente parafínica, naftênica ou aromática. Existem perto de 1.500 tipos de petróleo explorados no mundo, porém somente uma pequena porção deles é considerada apropriada para produzir asfalto (SHELL, 2003). Como os óleos crus têm composições distintas dependendo de sua origem, os asfaltos resultantes de cada tipo também terão composições químicas distintas.

Os CAPs são constituídos de 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligações covalentes. Os cimentos asfálticos de petróleos brasileiros têm baixo teor de enxofre e de metais, e alto teor de nitrogênio, enquanto os procedentes de petróleos árabes e venezuelanos têm alto teor de enxofre (LEITE, 1999).



A composição química é bastante complexa, apresentando influência no desempenho físico e mecânico das misturas asfálticas, mas sua maior influência está relacionada aos processos de incorporação e interação com os agentes modificadores, tais como os polímeros.

O asfalto é definido como um sistema coloidal constituído por micelas de asfaltenos dispersadas em um meio intermicelar oleoso, formado pela mistura de óleos aromáticos e saturados, chamados *maltenos*. (DNIT, 1998). Os métodos de separação do asfalto em frações têm um ponto comum que é a separação da parte sólida do asfalto (os *asfaltenos*) pela adição de um solvente que dissolva os *maltenos* e não dissolva os *asfaltenos*. Utiliza-se de uma propriedade fundamental dos sistemas coloidais, que é a destruição de sua estabilidade pela eliminação da camada de proteção das micelas, que faz com que elas se associem e precipitem pela ação da gravidade. É importante relatar que as proporções de *asfaltenos* e *maltenos* nos CAPs variam de acordo com sua exposição ao oxigênio, temperaturas ambientes e ao contato com óleos, graxas e combustíveis (BALBO, 2007).

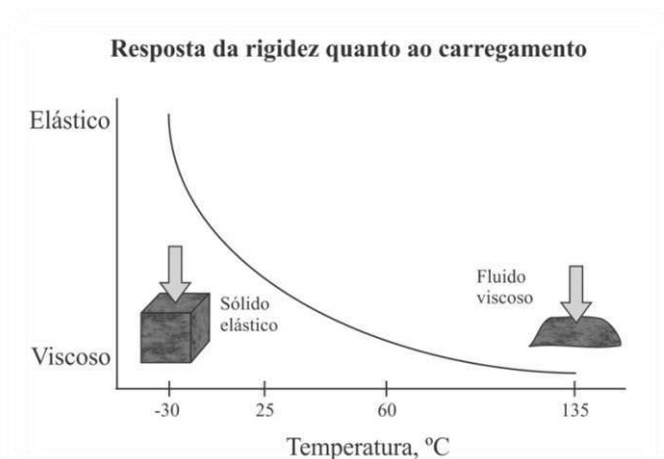
A química do asfalto do petróleo é estudada em níveis molecular e intermoleculares, os quais apresentam uma relativa complexidade. Em geral, as propriedades mecânicas do asfalto, em termos de reologia, estão relacionadas com a estruturação intermolecular entre os componentes polares. Estas interações podem surgir a partir do envolvimento de qualquer uma dos seus diferentes constituintes químicos. Portanto, existem diferenças significativas entre asfaltos, e esta, por sua vez, é função do tipo de petróleo usado para produzi-los.

O desenvolvimento de novas especificações para descrever e alcançar um comportamento reológico consistente, e, portanto, um desempenho mecânico da mistura asfáltica satisfatório, é prioritário para os usuários quando se considera a valoração econômica. A relação de custo-benefício aliado ao fornecimento (de petróleo) implica em uma grande variedade de materiais e há pouca chance de limitar as diferentes fontes de suprimento. Em outras palavras, a seleção de um conjunto limitado de óleos brutos para a produção de asfaltos é inviável técnica e economicamente. *Por conseguinte, é óbvio que a obtenção de um desempenho consistente de uma mistura asfáltica exige uma modificação da estrutura dos materiais que são produzidos atualmente.*

### **2.3.3 Suscetibilidade à Temperatura e Oxidação**

A suscetibilidade térmica trata-se de uma propriedade importante dos ligantes asfálticos e indica a sensibilidade da consistência dos mesmos à variação de temperatura, se os ligantes forem muito suscetíveis à variação de estado ou de propriedades frente à variação de temperatura, não serão desejáveis na pavimentação. Para Motta et. al (1996), essa característica é ao mesmo tempo uma virtude e algumas vezes, sua fraqueza. Isto é, suas propriedades são muito dependentes da temperatura. Por isso quase toda caracterização, tanto do ligante quanto da mistura com agregados deve ser acompanhada da temperatura em que foi realizada. Não especificar a temperatura de referência de um teste significa inviabilizar sua interpretação.

Em temperaturas muito baixas, as moléculas não têm condições de se mover uma em relação às outras e a viscosidade fica muito elevada; nessa situação o ligante se comporta quase como um sólido. À medida que a temperatura aumenta, algumas moléculas começam a se mover podendo haver um fluxo entre as mesmas. Como a viscosidade é um indicador da mobilidade das moléculas, o aumento do movimento faz com que viscosidade baixe, e em temperaturas altas o ligante se comporta como um líquido. Essa transição é reversível (BERNUCCI et al., 2006). A Figura 2.5 apresenta o comportamento viscoelástico do ligante asfáltico quando submetido a diferentes temperaturas.



**Figura 2.5 - Representação gráfica da propriedade viscoelástica do asfalto [Fonte: Motta et. al., (1996)]**

A oxidação é outra característica importante do ligante asfáltico, pois esta faz com que sua composição química seja alterada. Como resultado, ocorre o aumento da consistência do ligante e, conseqüentemente, da rigidez da mistura asfáltica, que, por sua vez, pode sofrer fissuração e desagregação. De acordo com Motta et. al (1996), essa rigidez é a origem do termo “endurecimento oxidativo” ou “endurecimento por envelhecimento”. Segundo Whiteoak (1990), quatro mecanismos principais explicam o endurecimento ou envelhecimento do asfalto:

- *Oxidação*: é a principal causa do endurecimento. A alta temperatura empregada e a presença do ar, durante a usinagem, tornam a oxidação intensa. Os grupos polares oxigenados tendem a se associar, formando micelas de alto peso molecular, provocando aumento da viscosidade. Embora a estocagem do asfalto também seja feita sob altas temperaturas, a oxidação é minimizada pela pequena superfície exposta ao ar;

- *Perda de voláteis*: parâmetro importante relacionado ao material volátil do ligante. Depende diretamente da temperatura e da condição de exposição. A perda é menor em ligantes asfálticos puros uma vez que tem baixo teor de voláteis.

- *Endurecimento físico*: ocorre à temperatura ambiente e é atribuído à reordenação de moléculas e à cristalização de parafinas. Trata-se de um fenômeno reversível;

- *Endurecimento exsudativo*: resulta da migração de componentes oleosos do ligante para o agregado mineral (absorção seletiva).

a) Viscosidade

Reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria por meio da análise das respostas (na forma de deformações ou tensões) de um material à aplicação de uma tensão ou de uma deformação (BRETAS e D'ÁVILA, 2005). A reologia do ligante asfáltico é definida pela sua resposta à tensão, deformação, tempo e temperatura (AIREY e BROWN, 1998).

Os líquidos viscosos são classificados geralmente em função do seu comportamento reológico, que envolve a determinação e a análise da relação entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade, também definido como grau de deformação ou taxa de cisalhamento para uma dada temperatura e pressão (MACHADO, 1998).

A obtenção da viscosidade pode ser obtida indiretamente através do ensaio de Viscosidade Saybolt Furol – Normas do DNER ME 004/94/ABNT NBR 14950/2003. O ensaio determina o estado de fluidez do CAP em diversas temperaturas (as normas atuais especificam três: 135°C, 150°C e 177°C). Consiste em medir o tempo, em segundos, que uma amostra de cimento asfáltico escoar por um orifício, vindo a encher um frasco receptor, até na marca de 60ml, depositado na parte inferior do viscosímetro (Figura 2.6).

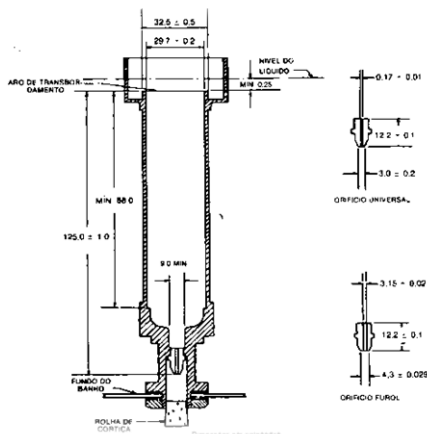


Figura 2.6 – Viscosímetro Saybolt Furol [LEP/DEC/UFCG]

Outra forma de obtenção da viscosidade é através do ensaio de Viscosidade Brookfield – Normas da ABNT NBR 15184/ ASTM D 4402. Este ensaio é utilizado na caracterização de ligantes pela metodologia de dosagem SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements) e permite obter a curva Viscosidade x Temperatura em ampla faixa de determinação utilizando a mesma amostra e fornece a viscosidade do ligante. A

medida de viscosidade proporciona determinar a consistência adequada do ligante para sua aplicação no campo e para obter uma mistura asfáltica com boa aderência entre o ligante e os agregados.

O ensaio é realizado em um viscosímetro cilíndrico, utilizado para medir a viscosidade de cimentos asfálticos em altas temperaturas, conhecido como Brookfield (Figura 2.7). O viscosímetro Brookfield mede a viscosidade através de um spindle (ponta de prova) em rotação constante e imerso em uma amostra do ligante. O spindle verifica o torque necessário para rotacionar a haste de prova sobre a amostra em uma velocidade específica. São utilizadas as temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C, e para estas são aplicadas as velocidades de 20, 50 e 100 RPM, respectivamente.



**Figura 2.7 – Viscosímetro Brookfields [Fonte: LEP/DEC/UFCG]**

## **2.4 Composições de Misturas Asfálticas**

Conforme o Manual de Asfalto (1989) o CAP é um tipo de mistura asfáltica que deve satisfazer aos requisitos relacionados à densidade aparente e a homogeneidade, que por sua vez, são inerentes às propriedades de estado, físicas e mecânicas dos materiais e da composição encontrada.

Para que a mistura asfáltica esteja inserida nas especificações normatizadas com o objetivo de prevenir desagregação prematura da mistura por carência de CAP e/ou superfícies escorregadias e deformáveis, a aplicação de revestimentos asfálticos deve ser precedida por procedimentos técnicos (ensaios) que permitam a estimativa do teor ideal de asfalto a ser utilizado.

Alguns fatores influenciam, de forma significativa, os procedimentos de dosagem de misturas asfálticas, entre eles podem citar: as temperaturas de misturas e de compactação, a viscosidade do CAP, a forma de compactação, e a quantidade do asfalto.

Uma grande variabilidade de agregados é utilizada na produção de concretos asfálticos para pavimentação. O principal mecanismo de deterioração apresentado pelos pavimentos flexíveis é inerente a compatibilidade de deformações entre as camadas da estrutura que podem ser relacionadas às fissuras por fadiga do revestimento. Estudos relacionados à dosagem das misturas asfálticas estabelecem um aumento da rigidez do revestimento asfáltico, dentro de critérios de módulos e espessuras, para impedir o acúmulo de deformação permanente em detrimento do aumento da vida de fadiga. A solução do problema depende da utilização de materiais capazes de suportar as tensões impostas pelo tráfego sob diferentes tipos de carregamento com uma compatibilidade de deformações da estrutura do pavimento composta de diferentes materiais.

O aumento da deformação permanente nesses pavimentos deve-se, entre outros fatores, ao aumento do volume de tráfego e da evolução tecnológica da modalidade rodoviária, que não foram computados aos métodos de dimensionamento atuais, o que possibilita que caminhões trafeguem com maiores cargas por eixo e, principalmente, com pressões de enchimento dos pneus muito acima dos 550 kPa (75 psi), valor de referência do AASTHO Road Test.

Com o objetivo de obter a qualidade e as propriedades adequadas para o projeto de misturas asfálticas é prudente selecionar os materiais proporcionalmente, encontrando uma combinação e graduação de agregados econômica (dentro dos limites pré-estabelecidos) com um teor de asfalto ideal, de forma que a mistura atenda as seguintes características:

- quantidade de asfalto suficiente para assegurar um pavimento com vida útil adequada;
- estabilidade mecânica que satisfaça a demanda do tráfego sem distorções ou deslocamentos plásticos acima dos limites pré-determinados;
- vazios em quantidade suficiente na mistura compactada de modo a permitir a expansão térmica do asfalto e dos agregados com a variação da temperatura;
- trabalhabilidade da mistura que permita a aplicação adequada da mistura sem segregação dos componentes;
- compatibilidade mecânica, em termos de deformações permanentes e reversíveis, entre as sucessivas camadas da estrutura do pavimento.

A insuficiência de CAP pode ocasionar a desagregação prematura da mistura e o seu excesso poderá acarretar em superfícies escorregadias e deformáveis. A fim de evitar quantidades insatisfatórias de CAP na mistura, a aplicação de revestimentos asfálticos deve ser precedida por procedimentos que permitam o controle na obtenção e na execução do teor de CAP de projeto.

Segundo Bernucci et al. (2007) a dosagem de uma mistura asfáltica tem consistido até hoje na escolha, com auxílio de procedimentos experimentais, de um teor dito “ótimo de CAP”, a partir de uma composição granulométrica de materiais pétreos predefinida. Acredita-se que esse termo tenha sido escolhido por analogia ao teor ótimo de umidade de um solo, pelo qual para uma determinada energia de compactação, é função somente da massa específica. A estimativa do teor ótimo de CAP em uma mistura com agregado consiste em uma tarefa extremamente complexa, pois seu valor deverá estar relacionado às propriedades de estado, físicas e mecânicas da mistura compactada.

Segundo Medeiros (2009) dosar uma mistura asfáltica significa estabelecer proporções de agregados e de “CAP”, que quando misturadas satisfaçam aos critérios normativos. Como forma de ressaltar sua definição convencional o teor ótimo de CAP estimado no processo de “dosagem” é denominado como teor de projeto. Em síntese, no método de dosagem é estimado um teor de asfalto em função dos estudos das propriedades de estado da mistura asfáltica, a partir de corpos de prova compactados em temperaturas controladas, as quais serão utilizadas durante o processo construtivo em campo.

O primeiro estudo de dosagem documentado para misturas asfálticas foi o *Hubbard-Field*, que inicialmente foi elaborado para dosagem de misturas de areia-asfalto, posteriormente sofreu alterações para aplicação em misturas com agregados graúdos. Entre os métodos em que objetivam o estabelecimento de relações entre ensaios realizados em laboratório e os resultados obtidos no campo, encontramos o método Hveem, o método Marshall, o método Triaxial de Smith e o método SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement) resultado de um programa de estudos, conhecido como Strategic Highway Research Program (SHRP) desenvolvido entre os anos de 1987 a 1993.

A primeira versão do método de dosagem de misturas betuminosas “Marshall” foi desenvolvido em 1939 por Bruce Marshall do Mississippi Highway Department (EUA). O desenvolvimento e a evolução do método Marshall foram baseadas em duas variáveis, as quais na época, foram consideradas mais significativas para o bom desempenho da mistura asfáltica, são elas: o teor de asfalto e a densidade da mistura. Segundo White (1985), em campo, o desempenho da mistura estaria relacionado ao teor ótimo de asfalto e a densidade da mistura. Porém, em laboratório a característica mais importante a selecionar seria a forma de compactação que reproduzisse a densidade induzida pelo tráfego, e, a escolha adequada das propriedades a serem “mensuradas” para estimativa do teor de asfalto que viesse a produzir um desempenho satisfatório em campo.

No método SUPERPAVE foram apresentadas mudanças nos procedimentos de ensaios para avaliação das propriedades reológicas do CAP, das propriedades de estado, físicas e mecânicas dos agregados graúdos e miúdos, da execução de compactação por amassamento (SUPERPAVE Giratory Compactor - SGC) e dos ensaios para aferir o comportamento mecânico de misturas asfálticas em laboratório (em função de variações de temperatura, carregamentos estáticos e repetidos, e na indução da presença de água, etc.).

No procedimento de dosagem de misturas asfálticas desenvolvido no programa SHRP são avaliadas as propriedades do CAP que visam simular as etapas do processo de mistura, espalhamento e compactação, bem como esteja associada às temperaturas do pavimento ao longo da vida útil do trecho onde o pavimento será construído.

#### **2.4.1 Compactação de Misturas Asfálticas**

O método de dosagem mais utilizado em nível mundial faz uso de compactação da mistura asfáltica por impacto (golpes ou por impacto), sendo denominado de Método Marshall, em referência ao engenheiro Bruce Marshall, que deu origem ao desenvolvimento desse procedimento em 1940. Utilizando o compactador Marshall os corpos de prova são submetidos ao impacto, podendo ser manual ou automática.

A compactação das misturas asfálticas pela metodologia Marshall durante vários anos vem sendo utilizada no Brasil, apesar de sofrer algumas críticas e proposições de mudanças durante anos seguidos. Um dos principais focos de discussão é a forma “por impacto”, que difere da forma utilizada em campo.

Aldigueri et al. (2001) afirmam que a simples modificação de uma compactação por impacto manual, a mais comumente utilizada no Brasil, por uma automática pode apresentar variação de teor ótimo de Cimento em 0,6%. Entre as principais críticas do método de compactação por impacto esta a pouca representatividade em relação ao campo, porém se adicionam também as variações obtidas na preparação dos corpos de provas (MOTTA, 1998).

A variação da energia de compactação influencia nos parâmetros volumétricos e por consequência as propriedades mecânicas podem gerar distorções de quatro pontos percentuais (4%) no valor do volume de vazios (ALBUQUERQUE et al. 2004). A escolha do tipo e da forma de compactação deve ser semelhante às condições de campo as quais são impostas durante as fases de vida útil do revestimento.

Segundo Motta (2005) devido à grande variabilidade nos valores dos parâmetros volumétricos dos corpos de prova, para garantir maior uniformidade entre os resultados de dosagem Marshall, deve-se estipular o tempo de compactação quando da utilização de compactação manual, e utilizar, sempre que possível, a compactação automática para eliminar a possível interferência ocasionada pelo ritmo de compactação imposto pelo operador e a perda de temperatura.

A variabilidade nos valores dos parâmetros volumétricos dos corpos de prova (massa específica, volume de vazios e relação asfalto vazios), inerente ao ensaio Marshall, é relativamente baixa nas misturas para Mistura Asfáltica. Por outro lado, as dispersões geralmente encontradas nos parâmetros de resistência mecânica da mistura, avaliados a partir da estabilidade e da fluência Marshall são mais significativas.

O desempenho do método Marshall é influenciado pelos seguintes fatores:

- tempo de mistura dos diversos materiais envolvidos, insuficiente para obtenção de misturas realmente homogêneas;
- compactação ineficiente e em desigualdade de condições de campo;
- e, o controle ineficiente da temperatura dos materiais envolvidos.

Segundo Roberts et al. (1996), o ideal ao compactar a mistura asfáltica em laboratório seria "simular", o mais próximo possível da realidade, as solicitações impostas por diferentes tipos de carregamentos nas etapas de construção e de vida útil do pavimento. O teor de ligante na mistura seria estimado a partir de três variáveis: porcentagem de vazios, tráfego, e a vida útil da mistura. Com isso, os corpos de prova, obtidos em laboratório, representariam melhor as condições de campo, possibilitando uma melhor análise do comportamento mecânico da mistura compactada e do valor estimado do teor ótimo de "asfalto" em laboratório, relacionando ao desempenho do pavimento em campo.

A partir de outubro de 1987 a março de 1993, nos Estados Unidos, foi desenvolvido o Programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*) que teve como objetivo geral a elaboração de especificações e a concepção de novos equipamentos para ensaios em cimentos asfálticos e em misturas betuminosas a quente. Foi então desenvolvido, entre outros, o conjunto de normas e equipamentos denominados "SUPERPAVE".

Para Motta et al. (1996) os pesquisadores do programa SHRP desejavam um dispositivo que compactasse a amostra de mistura asfáltica mais próxima da compactação em campo, de forma que as "densidades" finais fossem aquelas obtidas no pavimento sob condições reais de temperatura e de carregamento. Para os autores a principal diferença entre os procedimentos SUPERPAVE e o Marshall está no processo de compactação dos corpos de prova o que torna o SUPERPAVE menos susceptíveis aos desgastes e as patologias prematuras do revestimento Asfáltico. A compactação de misturas asfálticas por amassamento em substituição a do procedimento Marshall (por impacto) é sugerida por vários estudiosos do assunto entre eles: Cross (1999) e Lee et al. (2001).

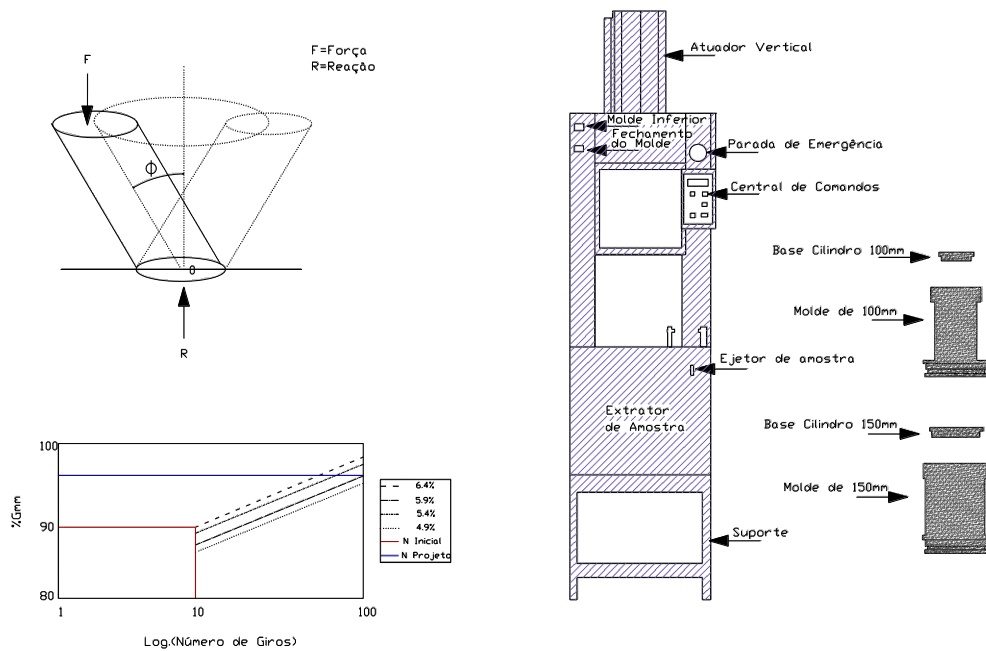
Para Brian J. C. e Kera Vanderhorst (1998) o procedimento de dosagem SUPERPAVE foi desenvolvido para simular, de forma mais realística possível, as condições de estado (volumetria) obtidas sob condições de carregamento e temperatura que ocorrem em campo.

O programa SRHP, atualmente bastante difundido nos Estados Unidos e no Canadá, constitui um dos avanços tecnológicos na área de projeto e de controle do desempenho de revestimentos constituídos de cimentos asfálticos, no qual estão relacionados os experimentos com os fundamentos racionais aplicados a situações inerentes de cada região desses países.



Projetado para compactar amostras de “misturas asfálticas” (*Hot Mix Asphalt - HMA*), com uma densidade semelhante à obtida em campo, o *Superpave Gyrotory Compactor (SGC)* redistribui as partículas de agregados de forma semelhante ao que ocorre em campo.

O SGC é um dispositivo mecânico onde os componentes principais que compõem seu sistema têm como base a estrutura de reação, base rotativa e motor, o medidor de altura e sistema de registro de dados e de carregamento, cabeça de carga, medidor de pressão e o molde e placa base (Figura 2.8).



**Figura 2.8 – Layout da compactação e da estrutura do Compactador Giratório Superpave (CGS)**  
[Fonte: SILVA, 2011]

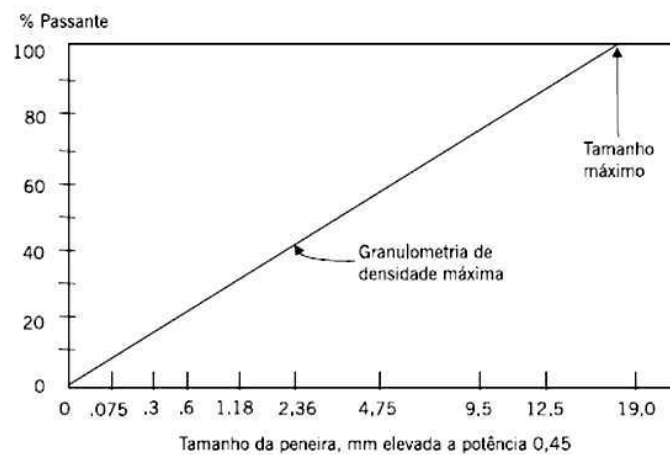
## 2.5 Dosagem SUPERPAVE

A Dosagem SUPERPAVE utiliza um conjunto de procedimentos, especificações e seleção de agregados. Embora nenhum novo ensaio de agregados tenha sido desenvolvido, métodos atuais de seleção e especificação de agregados foram aperfeiçoados e incorporados ao método. Estes, por sua vez, incluem os conceitos de ponto de controle e zona de restrição. O consenso do grupo de especialistas é que a forma e a angularidade dos agregados graúdo e miúdo, são críticas e devem ser avaliadas com o objetivo de verificar a adequação dos agregados quanto à sua influência no comportamento mecânico da mistura. A composição de agregados a ser utilizada deve estar dentro dos pontos de controle, abaixo ou acima da zona de restrição e não coincidir com a curva de densidade máxima na “*Curva de Fuller*”.

Para especificar a granulometria, no procedimento SUPERPAVE são utilizadas modificações com relação à abordagem tradicional. Uma importante característica deste gráfico é a curva de densidade máxima. Essa curva é composta por uma linha reta que parte da origem e vai até o ponto de agregado de Tamanho Máximo e Nominal Máximo que são definidos como sendo:

- Tamanho Máximo: Um tamanho de peneira maior do que o tamanho nominal máximo.
- Tamanho Nominal Máximo: um tamanho de peneira maior do que a primeira peneira que retém mais que 10%.

A curva de densidade máxima representa a distribuição dos tamanhos de partículas onde os agregados se encaixam da forma mais compacta possível (Figura 2.9). Esta, por sua vez, deve ser evitada para que o espaço entre os agregados não se torne excessivamente pequeno e permita resistência ao asfalto.



**Figura 2.9 - Granulometria de densidade máxima [Traduzido de ROBERT et al. 1996].**

Para especificação de granulometria de agregados foram adicionadas duas características extras ao gráfico de potência 0,45: pontos de controle e zona de restrição (Tabela 2.2 e Tabela 2.3). Os pontos de controle correspondem a pontos mestres onde a curva granulométrica deve se inserir. Eles estão no tamanho nominal máximo, um tamanho intermediário (2,36 mm) e um nos finos (0,075 mm).

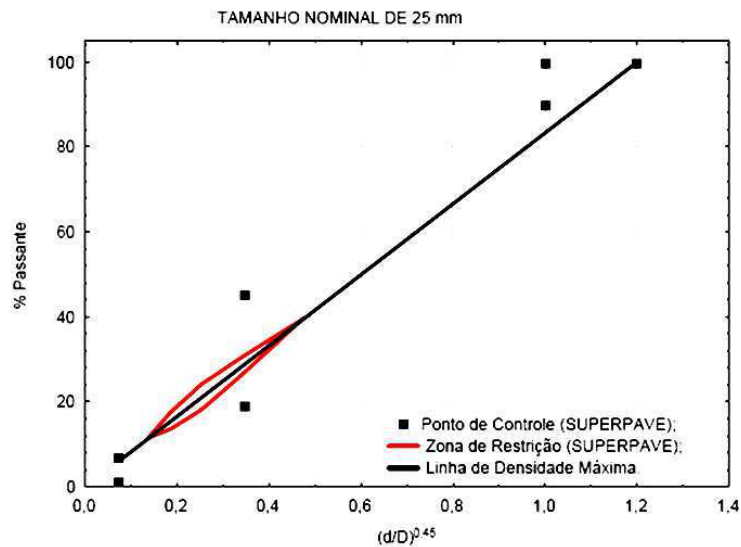
Tabela 2.2 - Pontos de controle de acordo com o tamanho máximo do agregado (SUPERPAVE).

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

Tabela 2.3 – Zona de restrição de acordo com o tamanho máximo do agregado (SUPERPAVE).

Zona de Restrição										
Abertura (mm)	Porcentagem em massa passante									
	37,5 mm		25,0 mm		19,0 mm		12,5 mm		9,5 mm	
	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
4,75	34,70	34,70	39,50	39,50	-	-	-	-	-	-
2,36	23,30	27,30	26,80	30,80	34,60	34,60	39,10	39,10	47,20	47,20
1,18	15,50	21,50	18,100	24,10	22,30	28,30	25,60	31,60	31,60	37,60
0,60	11,70	15,70	13,60	17,60	16,70	20,70	19,10	23,10	23,50	37,50
0,08	10,00	10,00	11,40	13,70	13,70	13,70	15,50	15,50	18,70	18,70

A zona de restrição localiza-se sobre a faixa inferior da curva de densidade máxima formando uma região em que a distribuição dos tamanhos dos agregados não deve tocar (Figura 2.10). As curvas que cruzam a zona de restrição são chamadas de “**granulometria corcunda**” devido à geometria característica na curva que indica a presença excessiva de areia fina, dificultando assim, a compactação da mistura e tornando-a susceptível a deformação permanente durante a vida útil. As curvas que tocam e/ou cortam a zona restrição possuem esqueleto pétreo frágil, que dependem muito da rigidez do “mastique” para possuírem uma resistência ao cisalhamento adequada.



**Figura 2.10 – Curva de Fuller & Thompson para representação da distribuição dos tamanhos das partículas de agregados para misturas asfálticas**

Os parâmetros volumétricos e as propriedades dos materiais constituintes da mistura asfáltica definem a estabilidade do revestimento asfáltico. O volume de vazios do agregado mineral (VAM) é a soma dos vazios preenchidos pelo ar e pelo Cimento Asfáltico Efetivo (não absorvido), na amostra compactada. Isso representa o espaço vazio entre as partículas de agregado, que é expresso em porcentagem do volume aparente da mistura compactada. O VAM é função da forma, da angularidade, da textura, da distribuição do tamanho das partículas, e do tipo e energia de compactação.

Outro importante requisito de mistura é o teor de filler. Este é calculado como a razão entre a porcentagem em peso do agregado mais fino do que a peneira de 0,075 mm pelo teor efetivo de asfalto expresso como porcentagem do peso total da mistura. O teor efetivo de asfalto é o Cimento Asfáltico total menos a quantidade absorvida. O teor de filler é usado na fase de projeto de mistura como um critério de projeto e pode variar entre 0,6 e 1,2 em relação ao teor de Cimento Asfáltico Efetivo.

A ZR vem sendo foco de diversos estudos nos últimos anos, devido principalmente aos questionamentos sobre a eficiência da mesma. As diretrizes apontadas pelo SUPERPAVE para agregados foram resultado do conhecimento de 14 especialistas, conhecidos como Aggregate Expert Task Group, e não de uma pesquisa laboratorial extensiva. Isso ocorreu devido ao foco dado pela pesquisa SHRP ao desenvolvimento de testes e especificações para ligantes asfálticos, bem como para dosagem das misturas, sem muito tempo para estudo dos agregados, que variam muito na natureza (VASCONCELOS, 2004).

A autora apud Cominsky et. al (1994) e Kennedy et. al (1994) acrescenta que na metodologia SUPERPAVE, além das recomendações de não passagem pela ZR, que as misturas com granulometria abaixo

da ZR deveriam ser utilizadas em preferência às que passavam acima da ZR para tráfego pesado. Essas graduações (abaixo da ZR) produzem granulometrias graúdas e maximizam o desenvolvimento de uma estrutura de agregados “robusta”.

Existem discordâncias na literatura sobre o assunto, de forma que diversos autores propõem a extinção da ZR dos procedimentos de dosagem SUPERPAVE (CHOWDHURY et al., 2001; HAND et al., 2001; HAND e EPPS, 2001; KANDHAL e COOLEY JR., 2002). De acordo com os estudos feitos por estes autores é verificado que a ZR é um fator ineficiente na definição da granulometria da mistura a ser adotada. As granulometrias escolhidas nestes trabalhos, acima da ZR, através da ZR e abaixo, podem apresentar melhor comportamento mecânico em relação uns aos outros, a depender dos testes escolhidos para análise e dos materiais adotados.

A análise granulométrica da dosagem SUPERPAVE, de posse dos materiais disponíveis na fase de misturas, consiste em combinar a granulometria individual dos materiais (agregados graúdos, miúdos e filler) em uma única granulometria em diferentes proporções.

Foram desenvolvidos três níveis de projeto de misturas:

a) O nível 1 - para tráfego com carga de eixo equivalente (ESAL: Equivalent Simple Axle Loads) abaixo de  $10^6$ . É requerido apenas projeto volumétrico. Engloba moldagem de corpos-de-prova usando o Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS) e a seleção do teor de ligante é baseado na % de vazios ( $V_a$ ), nos vazios do agregado mineral (VAM), na % de vazios preenchido com asfalto e razão filler/asfalto.

b) O nível 2 - para tráfego com ESAL entre  $10^6$  e  $10^7$ . Usam-se o projeto volumétrico como ponto de partida e uma bateria de testes com os equipamentos: Analisador de Cisalhamento SUPERPAVE (SUPERPAVE Shear Tester - SST) e Analisador de Tração Indireta (Indirect Tensile Tester - IDT). Estes são testes de predição de desempenho.

c) O nível 3 - para tráfego com ESAL acima de  $10^7$ . Engloba os passos dos níveis 1 e 2 e testes adicionais com o SST e IDT em uma faixa mais ampla de temperatura e ensaios com corpos-de-prova confinados (Testes de Predição Estendidos) (LEITE et. al, 1996). A Tabela 2.4 apresenta a aplicabilidade e requisitos de teste para cada nível.

Tabela 2.4 – Requisitos de testes para cada nível SUPERPAVE [fonte: Motta et al, (1996)]

Tráfego, ESALs	Nível de Projeto	Testes requeridos
$ESALs \leq 10^6$	1	Projeto volumétrico
$10^6 \leq ESALs \leq 10^7$	2	Projeto volumétrico + testes de predição de desempenho
$ESALs \geq 10^7$	3	Projeto volumétrico + testes de predição de desempenho estendidos

Em todos os casos, é testada a susceptibilidade à umidade usando o teste AASHTO T283

### 2.5.1 Seleção do Ligante

Segundo Marques (2004) o Grau de Desempenho do ligante (PG – Performance Grade) é designado pelas letras “PG” seguidas por dois números (por exemplo: PG 64-22).

Essa classificação se inicia com a verificação do histórico de temperaturas da região de implantação do material asfáltico. A especificação do material é dada por: PG x-y

x = Temperatura média dos 7 dias consecutivos de maior calor, a uma profundidade de 20mm da superfície do pavimento, no período de um ano; e

y = Menor temperatura encontrada na superfície do pavimento no período de um ano.

A especificação exige testes no material em três fases: quando novo, após a simulação do envelhecimento de curto prazo, ocorrido durante usinagem e aplicação do material, e após a simulação do envelhecimento de longo prazo, devido à oxidação do asfalto e perda de componentes voláteis do material durante os primeiros 5 a 10 anos de sua vida útil em pista.

### Propriedades físicas do ligante

As propriedades físicas medidas nos ensaios das especificações SUPERPAVE podem ser relacionadas diretamente com o comportamento do material em campo. Este sistema utiliza novos equipamentos para avaliação do comportamento dos ligantes asfálticos, sendo eles:

- Estufa de filme fino rotativo (Rolling Thin Film Oven – RTFO);
- Equipamento de envelhecimento por pressão (Pressure Aging Vessel – PAV);
- Reômetro de cisalhamento dinâmico (Dynamic Shear Rheometer – DSR);
- Viscosímetro rotacional de Brookfield (Rotational Viscometer – RV);

- Reômetro da viga de flexão (Bending Beam Rheometer – BBR);
- Equipamento para ensaio de tração direta em ligantes asfálticos (Direct Tension Tester – DTT).

Neto (2001) apud SRHP (1999) conceitua estes equipamentos. O RTFO é uma estufa que expõe filmes de ligantes asfálticos ao calor e a um fluxo de ar, tentando simular o envelhecimento dos ligantes causado pela volatilização dos óleos leves e oxidação dos componentes asfálticos que geralmente ocorre em operações de mistura na usina ou manuseio do material a altas temperaturas.

O PAV é um equipamento utilizado para simular o processo de envelhecimento dos ligantes asfálticos ao longo de sua vida de serviço devido a reação de oxidação das moléculas de asfalto com o oxigênio do ar.

O DSR é um ensaio utilizado para caracterizar o comportamento visco-elástico dos ligantes asfálticos através da medição do módulo complexo cisalhante ( $G^*$ ) e do ângulo de fase ( $\delta$ ) para construção da curva mestra.

O RV é um ensaio utilizado para determinar as características de fluxo dos ligantes asfálticos a altas temperaturas, indicando as condições que estes materiais podem ser bombeados a manuseados nas suas aplicações específicas.

O BBR é um equipamento utilizado para medir as propriedades físicas relacionadas à fluência dos ligantes asfálticos a baixas temperaturas. O ensaio mede quanto uma viga confeccionada com um determinado ligante asfáltico deforma quando submetida a uma carga constante para uma dada temperatura.

O DTT é um ensaio complementar ao BBR, que também serve para caracterizar o comportamento dos ligantes asfálticos quanto à fluência para baixas temperaturas. No ensaio, uma amostra de ligante é submetida a um esforço de tração direta, medindo-se a sua deformação até a ruptura.

### **2.5.2 Seleção dos Agregados**

As propriedades de consenso, estabelecidas pelos pesquisadores da SHRP para os agregados no SUPERPAVE, são de extrema importância para o desempenho da mistura asfáltica, devendo satisfazer a todos os tipos de carregamentos, estas propriedades são:

- Angularidade do agregado graúdo;
- Angularidade do agregado miúdo;
- Partículas planas e alongadas;
- Teor de argila (equivalente areia).

Ainda para o projeto SUPERPAVE devemos considerar as propriedades de origem como dureza, sanidade e materiais deletérios, que são dependentes da origem dos agregados, mas seus valores limites não foram especificados por serem dependentes da fonte.

### Angularidade de agregados graúdos

De acordo com Marques (2004) a especificação da angularidade de agregados graúdos visa obter misturas asfálticas com alto valor de coeficiente de atrito interno e assim alta resistência ao cisalhamento para resistir ao afundamento por trilha de roda. Nos agregados graúdos é definida como a porcentagem em peso de agregado maior que 4,75 mm que tenha uma ou mais faces fraturadas. Uma face fraturada é definida como qualquer superfície fraturada que ocupe mais do que 25% da área do agregado visível nesta orientação. A Tabela 2.5 apresenta os requisitos mínimos exigidos para a angularidade dos agregados graúdos segundo a especificação SUPERPAVE que é função do volume de tráfego e da posição dentro do pavimento.

**Tabela 2.5 - Requisitos SUPERPAVE de angularidade de agregados graúdos**

<b>Angularidade de Agregados Graúdos</b>		
<b>Tráfego ESALs</b>	<b>Espessura a partir da superfície</b>	
	<b>≤ 100 mm</b>	<b>&gt; 100 mm</b>
$< 3 \times 10^5$	55/-	-/-
$3 \times 10^5$ a $3 \times 10^6$	75/-	50/-
$3 \times 10^6$ a $1 \times 10^7$	85/80	60/-
$1 \times 10^7$ a $3 \times 10^7$	95/90	80/75
$> 3 \times 10^7$	100/100	100/100

### Angularidade de agregados miúdos

De acordo com Bernucci et. al (2006) a angularidade do agregado miúdo garante o atrito entre as partículas que propicia a resistência à deformação permanente. É definida como a porcentagem de vazios de ar presentes em agregados com tamanhos de partículas menores que 2,36mm, em uma condição de estado solto. Alto teor de vazios significa muitas faces fraturadas. A Tabela 2.6 apresenta os requisitos mínimos exigidos para a angularidade dos agregados miúdos.



Tabela 2.6 - Requisitos SUPERPAVE de angularidade de agregados miúdos

Angularidade de Agregados Miúdos		
Tráfego 10 <sup>6</sup> ESALs	Espessura a partir da superfície	
	≤ 100 mm	> 100 mm
< 0,3	-	-
< 1	40	-
< 3	40	40
< 10	45	40
< 30	45	40
< 100	45	45
≤ 100	45	45

### Partículas chatas e alongadas

Agregados longos tendem a quebrar quando estão presentes em misturas asfálticas durante as fases de usinagem, compactação e passagem do tráfego. De acordo com Motta et. al (1996) esta característica é a percentagem em peso de agregados graúdos que tem a relação dimensão máxima/mínima maior que 5.

Este ensaio é feito em agregados maiores que 4,75 mm (peneira nº 4) e utiliza um dispositivo comparador especial que mede a razão dimensional de uma partícula de agregado. A Tabela 2.7 apresenta os requisitos SUPERPAVE máximos para este parâmetro.

Tabela 2.7 - Requisitos SUPERPAVE de partículas alongadas e chatas

Espessura a partir da superfície	
Tráfego ESALs	Porcentagem Máxima
< 3 x 10 <sup>5</sup>	-
3 x 10 <sup>5</sup> a 3 x 10 <sup>6</sup>	10
3 x 10 <sup>6</sup> a 1 x 10 <sup>7</sup>	10
1 x 10 <sup>7</sup> a 3 x 10 <sup>7</sup>	10
> 3 x 10 <sup>7</sup>	10

### Teor de argila

É a percentagem de material argiloso presente na fração passante na peneira de 4,75 mm (nº 4). Sem a presença de argila, a adesividade entre o ligante asfáltico e o agregado é reforçada ou melhorada. O ensaio é AASHTO T 176-86 ou ASTM D 2419-02 é denominado “finos plásticos em agregados graduados e solos usando

o ensaio de equivalente de areia”. A Tabela 2.8 apresenta os requisitos mínimos SUPERPAVE para o teor de argila.

**Tabela 2.8 - Requisitos SUPERPAVE para o teor de argila**

<b>Teor de Argila (Equivalente de Areia)</b>	
<b>Tráfego ESALs</b>	<b>Equivalente de Areia, mínimo</b>
< 0,3	40
< 1	40
< 3	40
< 10	45
< 30	45
< 100	50
≤ 100	50

### **Teor de pó**

Refere-se à parcela dos agregados com tamanho menor que 0,075mm (passante na peneira nº 200). Seu cálculo é feito como a razão entre a porcentagem em peso do agregado passante na peneira nº 200 (0,075mm) e o teor de asfalto efetivo. A faixa de aceitação deste parâmetro segundo o SUPERPAVE é de 0,6 a 1,2 para todas as misturas. Quando a curva granulométrica da mistura passar abaixo dos limites da zona de restrição, a faixa de aceitação pode ser aumentada para 0,8 a 1,6 (MARQUES, 2004).

### **2.5.3 Requisitos Volumétricos da Dosagem SUPERPAVE**

Além da compactação na pesquisa SHRP várias mudanças foram realizadas. Para Vasconcelos (2004) foi proposta uma metodologia distinta que consiste basicamente em estimar um teor provável de projeto através da fixação do volume de vazios e do conhecimento da granulometria dos agregados disponíveis. São escolhidas três composições granulométricas distintas, dentro da faixa a ser adotada, calculando-se a seguir as prováveis características volumétricas que estas três misturas vão apresentar. As características volumétricas são determinadas a partir dos valores da densidade máxima teórica e aparente a que vão chegar cada conjunto de agregados, levando-se sempre em conta o grau de absorção dos mesmos.

De acordo com Bernucci et. al (2006) o passo seguinte é a compactação de corpos-de-prova (CGS) com teores de ligante para cada mistura (dois corpos-de-prova por mistura), obtido por meio de estimativas usando-se a massa específica efetiva dos agregados. Dessas misturas experimentais se obtêm as propriedades volumétricas ( $V_a$ , VAM e RBV) após a compactação dos corpos-de-prova no compactador giratório com o número de giros de projeto.

Os requisitos volumétricos da mistura, para a dosagem SUPERPAVE, constituem-se em: Volume de vazios, Vazios do Agregado Mineral e a Relação betume/vazios. Estes devem obedecer aos seguintes requisitos (MARQUES, 2004):

- Volume de vazios ( $V_a$ ): O teor de vazios de projeto na mistura é de 4%;
- Vazios do Agregado Mineral (VAM): Para um projeto com 4% de  $V_a$ , o VAM é especificado em função do Tamanho Nominal Máximo do agregado;
- Relação betume/vazios (RBV): Para um projeto com 4% de  $V_a$ , o RBV é especificado em função do volume de tráfego.

Especificar o valor mínimo de VAM para um projeto de mistura em 4% é função do tamanho nominal máximo do agregado (A Tabela 2.9 apresenta os valores mínimos dos VAM recomendados pelo SUPERPAVE).

**Tabela 2.9 - Valores mínimos dos VAM (SUPERPAVE) [Fonte: Motta et al 1996]**

<b>Vazios de Agregado Mineral (VAM)</b>	
<b>Tamanho Nominal máximo do Agregado</b>	<b>VAM, mínimo (%)</b>
9,5 mm	15,0
12,5 mm	14,0
19 mm	13,0
255 mm	12,0
37,5 mm	11,0

O RBV, volume de ligante asfáltico efetivo, é expresso como porcentagem de VAM. A Tabela 2.10 apresenta as faixas de valores de RBV em função do volume do tráfego em um projeto com 4% de vazios da mistura.

**Tabela 2.10 – Faixa de valores de RBV (SUPERPAVE) [Fonte: Asphalt Institute (2001)].**

<b>Relação Betume/Vazios (RBV)</b>	
<b>ESALs (milhão)</b>	<b>Volume de ligante efetivo – RBV (%)</b>
< 0,3 mm	70 – 80
0,3 a < 3	65 – 78
3 a < 10	65 – 75
10 a < 30	
= 30	

Outro requisito de mistura é a relação pó/asfalto (TF - Teor de filer) que é calculado como a razão entre a porcentagem em peso do agregado mais fino do que a peneira de 0,075 mm pelo teor efetivo de asfalto expresso como porcentagem do peso total da mistura (Equação 2.1). O teor efetivo de asfalto é o teor de asfalto total menos a quantidade absorvida. O teor de filer é usado na fase de projeto de mistura como um critério e pode variar entre 0,6 e 1,2 em relação ao teor de Cimento Asfáltico Efetivo. Em geral, podendo ser aumentados para 0,8 a 1,6 se a graduação dos agregados passar abaixo dos limites da zona restrita. Com esta permissão, uma quantidade maior de material mais fino que 0,075mm poderá ser utilizada.

$$TF = \frac{P}{P_{be}} \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde:

TF = Teor de filer;

P = % passante na peneira de 0,075 mm da massa do agregado;

$P_{be}$  = teor efetivo de asfalto (% em peso).

A especificação AASHTO MP2 (2001) fixa limites para porcentagem da Massa Específica Máxima Medida (%Gmm) que é obtida pela mistura para o  $N_{ini}$ ,  $N_{projeto}$  e  $N_{max}$  em função do tráfego. A Tabela 2.11 demonstra estes limites.

**Tabela 2.11 - Requisitos SUPERPAVE para %Gmm [Fonte: AASHTO MP2 (2001)]**

% Gmm			
Tráfego ESALs	$N_{ini}$	$N_{projeto}$	$N_{max}$
$< 3 \times 10^5$	= 91,5	= 96,0	= 98,0
$3 \times 10^5$ a $3 \times 10^6$	= 90,5		
$3 \times 10^6$ a $1 \times 10^7$	= 89,0		
$1 \times 10^7$ a $3 \times 10^7$			
$> 3 \times 10^7$			

## 2.6 Propriedades das Misturas Asfálticas

O conhecimento adequado das propriedades de estado, físicas e mecânicas de misturas asfálticas pode refletir, de forma direta e/ou indireta, no desempenho dos revestimentos asfálticos durante a vida útil do pavimento. Este, por sua vez, pode ser dimensionado a partir de métodos que levam em conta a compatibilidade das deformações entre as sucessivas camadas do pavimento (Métodos Racionais ou Mecanísticos), que aliados

às medições diretas realizadas em campo, tornam-se ferramentas indispensáveis para o estudo das composições, dos constituintes e dos agentes modificadores (aditivos) de misturas asfálticas, visando estabelecer uma dosagem racional e adequada aos níveis e às formas de diferentes tipos de carregamento em consonância com as variações sazonais inerentes do meio ambiente local.

Segundo MEDINA e MOTTA (2005), a tendência mundial é o estabelecimento de métodos de dimensionamento mecânicos tanto para pavimentos flexíveis, quanto para os rígidos, novos e/ou restaurados. Entretanto, no dimensionamento de um pavimento por um método mecânico devem ser considerados parâmetros de entrada que representem os materiais constituintes da estrutura do pavimento, à influência do meio ambiente e o efeito do tráfego ao longo de sua vida de projeto (vida útil). Associado a estes, como objetivo fim, devem ser inseridos diferentes modelos de desempenho considerando o comportamento funcional e estrutural dos pavimentos.

### 2.6.1 Propriedades de Estado de uma Mistura Asfáltica

Os principais componentes das misturas asfálticas definem o desempenho dos pavimentos a partir das proporções relativas de suas propriedades (Figura 2.11). Os agregados que constituem a mistura asfáltica precisam apresentar intertravamentos, os quais são obtidos através dos agregados angulares ou agregados de textura superficial rugosa. Os agregados arredondados ou de superfície lisas deverão ser evitados por possuírem a tendência de deslizar uns sobre os outros, resultando em misturas com menor estabilidade.

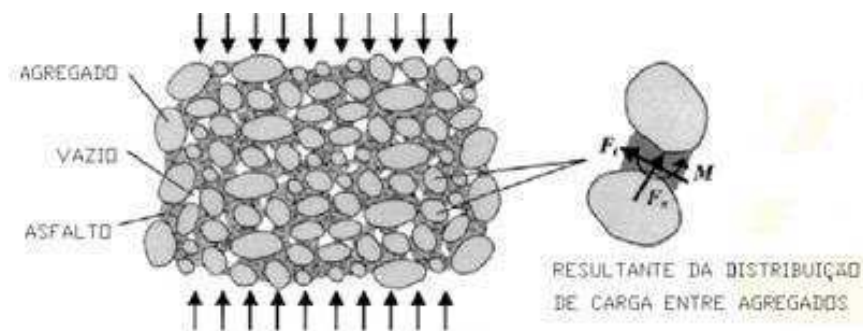


Figura 2.11 - Ilustração dos componentes das misturas asfálticas que definem suas proporções relativas

[Fonte: Bernucci et al, 2007]

O bom desempenho de uma Mistura Asfáltica está relacionado, também, à resistência ao cisalhamento do agregado. Quando aplicada uma carga sobre uma massa de agregados, estes poderão começar a deslizar um em relação ao outro, o que resulta em uma deformação permanente da mistura.

Nos projetos de misturas, para que os parâmetros utilizados como critério de projeto sejam calculados adequadamente, devemos analisar o peso específico do agregado e a absorção de asfalto que exercem grande efeito nos parâmetros volumétricos e influenciam a determinação do teor de asfalto efetivo da mistura.

Segundo Roberts et al. (1996) o procedimento *Marshall* predominou entre os anos de 1940 a 1990, observando que um determinado método de dosagem porém, não se aplica a todos os tipos de mistura. Segundo o Manual de Asfalto (1989), os procedimentos citados não se adequam, por exemplo, para misturas com diâmetro máximo do agregado maior que 25 mm.

Dentre os parâmetros mais utilizados destacamos o volume de vazios ( $V_a$ ), a “Densidade” Máxima Teórica da Mistura (DMT) e a “densidade” aparente do corpo de prova compactado. A DMT pode ser obtida em diferentes formas de cálculo, ou com resultados obtidos em laboratório. No Brasil, ela é calculada com auxílio de uma ponderação das “densidades” reais dos materiais constituintes da mistura.

A DMT pode ser influenciada pelos diferentes procedimentos que podem levar a resultados distintos, acarretando em uma variação do teor de projeto de asfalto. As propriedades volumétricas de uma mistura asfáltica são determinadas a partir da densidade aparente dos agregados, da densidade aparente do corpo de prova compactado e da DMT.

A DMT das Misturas Asfálticas e a Massa Específica Máxima Medida ( $G_{mm}$ ) são usadas no cálculo do percentual de vazios de misturas asfálticas compactadas, absorção de Cimento Asfáltico pelos agregados, peso específico efetiva do agregado, teor de asfalto efetivo da mistura asfáltica e ainda para fornecer valores alvo para a compactação de misturas asfálticas com auxílio da compactação por amassamento (Giratória).

O valor da DMT é também utilizado na determinação da massa específica de misturas asfálticas já compactadas em campo. Enfatizada também no cálculo da absorção de CAP pelos agregados, da densidade efetiva do agregado, no cálculo do percentual de vazios de misturas asfálticas compactadas, do teor de asfalto efetivo da mistura asfáltica e para fornecer valores alvo para a compactação de misturas asfálticas com auxílio do compactador giratório (ASTM D 2041).

Segundo Roberts et al. (1996), muitos estados americanos especificam o peso específico de misturas asfálticas obtido em campo como um percentual da DMT para os diferentes percentuais de CAP. Em conjunto com a espessura do pavimento, a DMT é necessária para a estimativa do peso específico da mistura, sem extração de corpos de prova, com o auxílio do método nuclear (SCHMITT et al. 1997).

Segundo Roberts et al. (1996), uma compreensão básica da relação massa-volume de misturas asfálticas compactadas é importante tanto do ponto de vista de um projeto de mistura quanto do ponto de vista da sua execução no campo. O projeto de mistura é um processo cujo propósito é determinar a quantidade de CAP e agregados para compor uma mistura com as propriedades de estado, físicas e mecânicas adequadas a sua utilização.

Para determinar a densidade máxima da mistura a Norma da ASTM D 2041/2000 apresenta a sequência do ensaio utilizando o equipamento Rice Test (Figura 2.12). Pesa-se, inicialmente, 1500g da mistura

(para tamanho máximo nominal de até 12,5mm). Em seguida, este é preenchido com água a 25°C até que toda a mistura fique coberta. É então aplicada uma pressão residual no recipiente de 30mmHg (diferença entre 760mm e 730mm), por um período de 15 minutos, a fim de expulsar os vazios existentes entre os filmes de ligante. Logo após esse período é restabelecida pressão ambiente no recipiente metálico. Finalmente, o recipiente, juntamente com a mistura e a água, é pesado imerso. A DMT, ou G<sub>mm</sub>, conforme descrito na referida norma, é determinada por:

$$G_{mm} = \frac{A}{A-(C-B)} \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde:

G<sub>mm</sub> = Massa Específica Máxima Medida ;

A = massa da amostra seca em ar, g;

B = massa do recipiente metálico imerso em água, g;

C = massa do recipiente + amostra imerso em água, g.



Figura 2.12 – Rice Test (ASTM D 2041/2000) [LEP/UAEC/UFCG]

## 2.7 Parâmetros Relevantes de Misturas Asfálticas para a Pavimentação Asfáltica

### 2.7.1 Módulo de Resiliência

O Módulo de Resiliência ( $M_R$ ) é um parâmetro relacionado às propriedades mecânicas inerentes ao comportamento “elástico” (Rigidez), dos materiais utilizados em camadas de pavimentos flexíveis. Seu cálculo é realizado a partir da relação entre as tensões e as deformações “reversíveis” obtidas em ensaios com aplicação de carregamentos repetidos sob condições de temperatura controladas.

Segundo BRITO (2006) e MEDINA E MOTTA (2005), os estudos sobre a resiliência dos materiais

usados em pavimentação foram iniciados na década de 1930 com *Francis Hveem*, que relacionou as deformações recuperáveis com as fissuras nos revestimentos asfálticos. “Segundo os autores, foi ele quem adotou o termo “Resiliência”, que é definido classicamente como “a energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações”. O nome Módulo de Resiliência (*Resilient Modulus*) foi criado para que não fosse confundido com o Módulo de Young.

Atualmente o Módulo de Resiliência de misturas asfálticas é usado com o auxílio da teoria de elasticidade como ferramenta de análise e de projeto de pavimentos flexíveis. Caso uma pequena carga, comparada a carga que leva a ruptura do material, for aplicada e após um relativo número de ciclos de carregamentos (100 a 500 ciclos) a deformação for considerada quase ou completamente recuperável e proporcional ao valor da carga aplicada, o comportamento mecânico da mistura asfáltica, sob condições de temperatura controladas, pode ser admitido como sendo “elástico”.

No ensaio para determinação do  $M_R$  de misturas asfálticas são aplicados carregamentos repetidos (ciclo e frequência pré-determinados) no plano diametral de um corpo de prova cilíndrico de dimensões padronizadas (Tração Indireta). A aplicação do carregamento tem por objetivo gerar uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação da carga, o que provoca o deslocamento diametral “recuperável” na direção horizontal, correspondente à tensão gerada, sob uma determinada temperatura (T) (Figura 2.13).

Witczak & Root (1974) e Khanal & Mamlouk (1995) inferem que os ensaios em corpos de prova de prova cilíndricos por compressão podem ser mais representativos das condições em que as misturas asfálticas estão submetidas em campo (Figura 2.14).



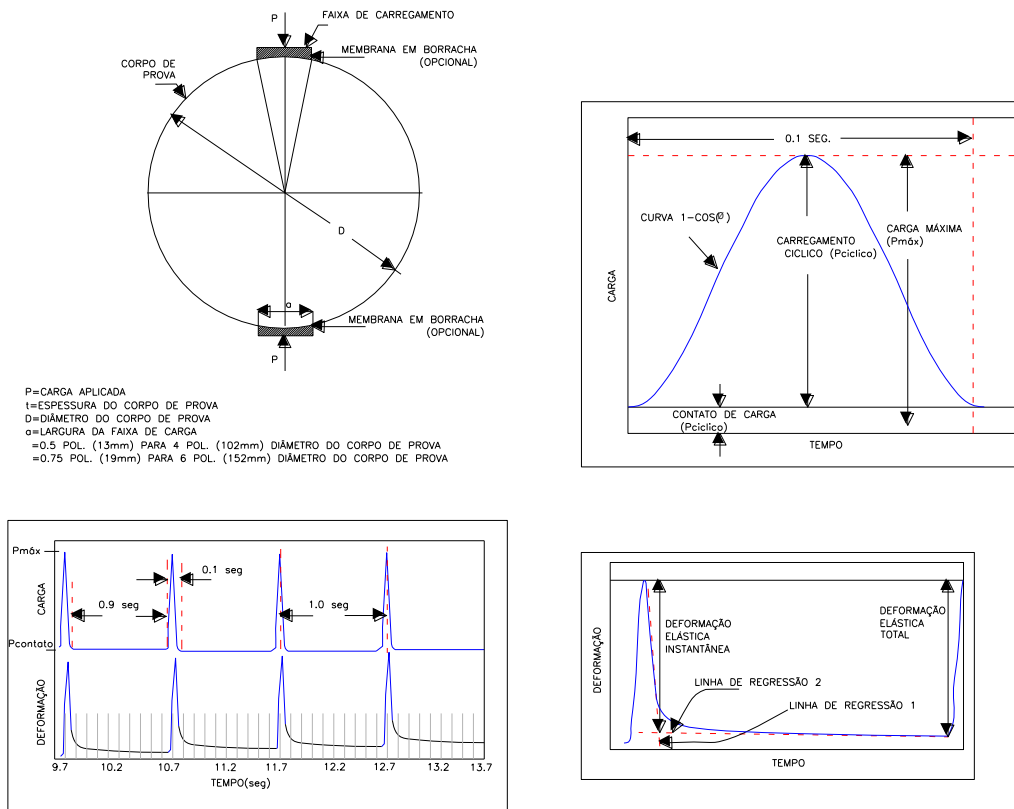


Figura 2.13 – Informações para a realização do ensaio de módulo de resiliência em corpos de prova submetidos à tração indireta por compressão diametral [Fonte: SILVA, 2011]

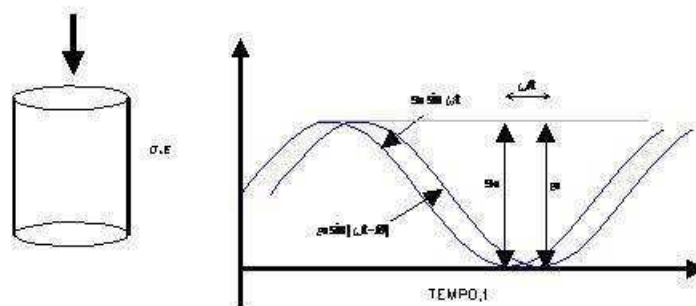


Figura 2.14 – Informações para realização do ensaio de Módulo Dinâmico ( $E^*$ ) sob carregamento de tensão na compressão [Fonte: SILVA, 2011]

As misturas asfálticas herdam a viscoelasticidade apresentada pelo CAP que por sua vez possuem níveis de deformações dependentes do tempo de ação da carga e da temperatura. Assim, quanto mais rápida a aplicação das cargas, menor a deformação resultante medida e maior o Módulo de Resiliência mensurado. Este fenômeno pode ser observado a partir da análise do efeito do tipo de carregamento ou velocidade do veículo, em função da tensão vertical equivalente versus profundidade da camada do pavimento.

### 2.7.2 Módulo Complexo

Por definição, o módulo complexo,  $E^*$ , é um número que relaciona tensão e deformação para materiais viscoelásticos sujeitos a carregamento senoidal aplicado num certo domínio de frequência.

Fonseca (1995) define o módulo complexo como:

$$E^* = \frac{\sigma_0 \text{sen} \omega t}{\varepsilon_0 \text{sen}(\omega t - \varnothing)} \quad \text{Equação 2.3}$$

Onde:

$E^*$  = Módulo Complexo;

$\sigma_0, \varepsilon_0$  = Tensão e deformação máximas (pico);

$\omega$  = frequência angular em rad/s;

$t$  = tempo em s;

$\varnothing$  = ângulo de fase em graus (ângulo em que o pulso  $\varepsilon_0$  atrasa em relação à  $\sigma_0$ ).

Pela definição, o módulo complexo  $E^*$  é composto tanto de uma parte real, quanto de uma parte imaginária, ou:  $E^* = E' + iE'' = |E^*| e^{i\varnothing}$ .

A parte real do módulo complexo para um material elástico ( $\varnothing = 0$ ) é chamada de módulo dinâmico e é simplesmente o valor absoluto do módulo complexo, ou:

$$E(\text{dinâmico}) = |E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad \text{Equação 2.4}$$

Onde:

$|E^*|$  = Módulo dinâmico;

$\sigma_0, \varepsilon_0$  = Tensão e deformação máximas (pico).

O  $|E^*|$  (módulo dinâmico) tem sido a base para o desenvolvimento de modelos de previsão para caracterizar a resposta tensão deformação de misturas asfálticas, quando o material não é elástico.

O ensaio do módulo complexo foi desenvolvido para medir tanto viscoelasticidade quanto propriedades elásticas de materiais de pavimentos. O desenvolvimento original deste ensaio é anterior à 1960 e foi feito pelos pesquisadores da Universidade do estado de Ohio, nos EUA. Em 1979 foi adotado pela ASTM como método de

ensaio padrão para determinação do módulo dinâmico de misturas asfálticas (ASTM D 3497-79). O ensaio do módulo complexo foi desenvolvido para medir tanto viscoelasticidade quanto propriedades elásticas de materiais de pavimentos.

O corpo-de-prova deve ter uma relação altura/diâmetro de 2:1 e diâmetro mínimo de 10 cm. O dispositivo de carregamento deve ser capaz de transmitir ondas de forma senoidal em frequências de 0,1 a 20 Hz e uma tração máxima de 0,7 MPa. Deve haver dispositivo para controle de temperatura uma vez que as amostras são testadas a várias temperaturas.

### 2.7.3 Ensaio de Vida de Fadiga

Fadiga é definida pela *American Society for Testing and Materials*: como sendo “o processo da mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis que produzem as fissuras que conduzem para totalizar a falha após um determinado número de ciclos”.

A determinação da vida de fadiga das misturas asfálticas é feita a partir de ensaios de laboratório ou de campo e a sua resistência à fadiga é geralmente caracterizada por uma curva representando a vida útil – expressa em números de ciclos de carregamento ( $N$ ) – em função da deformação de tração ( $\epsilon_t$ ) ou da tensão de tração ( $\sigma_t$ ) necessária para levar o material à ruptura (Figura 2.15).

A fadiga ocorre por meio de ações mecânicas e/ou térmicas que não parecem críticas por si, se comparadas à resistência sob carregamento estático, mas na verdade são decisivas para a vida útil do material. Em uma estrutura submetida aos carregamentos cíclicos, diversos estágios convencionalmente divididos podem ser diferenciados durante um processo de fadiga, conforme ilustra a Figura 2.15.

- Região I: onde as primeiras mudanças microestruturais ocorrem; formam-se microfissuras; a densidade dos deslocamentos cresce e as zonas de danos irreversíveis se iniciam.
- Região II: caracterizada pelas microfissuras originadas da coalescência das microfissuras.
- Região III: crescimento das microfissuras conduzindo rapidamente ao colapso total.

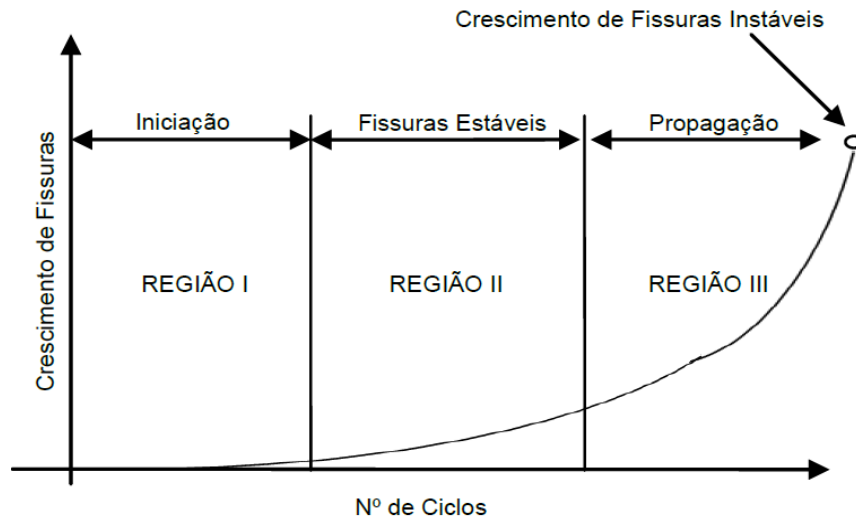


Figura 2.15 - Estágios existentes em um processo de fadiga. [Fonte: Bernucci et al. 2007]

O ensaio de vida de fadiga praticado no Brasil, para definição do número de repetições de carga, é realizado por compressão diametral [Tração Indireta] à tensão controlada (TC), sendo a carga aplicada numa frequência de 1Hz com o auxílio de equipamentos eletro-hidráulicos e pneumáticos (PINTO, 1991; RODRIGUES, 1991; MEDINA, 1997).

No decorrer do ensaio de fadiga, a deformação por tração aumenta até o rompimento completo do corpo de prova. Esse tipo de ensaio é compatível com a caracterização de materiais de revestimentos asfálticos mais espessos em decorrência da predominância de absorção das tensões por revestimentos com relação às camadas subjacentes (PINTO, 1991; HUANG, 1993). No caso de ensaio à deformação controlada (DC), a simulação corresponde aos revestimentos mais delgados uma vez que nestes há maior contribuição das subcamadas na absorção das tensões solicitantes.

Para a determinação da vida de fadiga são realizados arranjos de ensaios que permitem a aplicação de esforços dinâmicos e cíclicos nas amostras moldadas ou extraídas do revestimento asfáltico. A seguir são descritos exemplos de arranjos e as descrições de ensaios de fadiga, ressaltando-se que os principais tipos de equipamentos utilizados são do tipo pneumáticos e eletro-hidráulicos.

*Vigotas em Flexão:* a força é aplicada verticalmente em dois terços do comprimento da vigota, e essa aplicação poderá ser em um ou ambos os sentidos de uma mesma direção, para a determinação da resistência à tração na flexão em uma zona com momento fletor constante.

*Amostras Cilíndricas em Torção:* a amostra cilíndrica é submetida à esforços de torção, compostos por ciclos de aplicação harmonicamente opostos, criando zonas de tração e de compressão em uma seção circular

da amostra. Os ensaios são realizados com frequência de 10Hz, estabelecendo um padrão de deformação que é controlado ao longo do ensaio gerando novamente estados de tensões uniaxiais.

*Tração Uniaxial:* as amostras cilíndricas ou prismáticas (cúbicas) podem ser submetidas a ensaios cíclicos de tração direta, realizados tanto em baixas como em altas frequências (>25Hz). Impõem um estado de tração uniaxial, e a fratura se daria na seção mais frágil da amostra. O nível de deformação possível para um material mais dúctil submetido a este tipo de ensaio seria controlado por ciclos alternados de tração-compressão da amostra.

*Tração Indireta ou Compressão Diametral (Brazilian Test):* conhecido com ensaio dinâmico de compressão diametral, o arranjo permite a criação de uma zona tracionada que coincide com o plano de aplicação das cargas, sendo portanto, a zona de fratura. Os testes são realizados em níveis de frequência baixo a médio (1 – 15Hz), com a amostra submetida a um estado de tensões biaxial, e as seções verticais da amostra submetidas aos esforços de compressão, e as seções horizontais, por sua vez, submetidas aos esforços de tração. Observa-se que, durante tal tipo de ensaio, os materiais mais dúcteis apresentarão deformações permanentemente progressivas, mesmo porque não há uma alternância de esforços para uma compensação da deformação viscoelástica durante cada ciclo de aplicação de cargas.

*Flexão em Amostras Trapezoidais:* uso de equipamento eletromagnético desenvolvido na escola francesa, para execução de ensaios de fadiga, sobretudo à deformação controlada, com o emprego de corpos de prova com formato trapezoidal. A força é aplicada na menor seção da amostra, enquanto a extremidade oposta encontra-se engastada em uma base. O ensaio simula esforços de flexão, sendo facilmente controlada a deformação elástica aplicada, trabalhando em flexão alternada para a rápida recuperação da deformação, no caso de ensaios com misturas asfálticas. Ensaio realizado com frequências abaixo de 20Hz.

Embora ainda não normatizado, o ensaio de fadiga tem sido largamente realizado no país, geralmente à compressão diametral sob tensão e temperatura controladas. Utiliza-se uma frequência de 60 aplicações por minuto com 0,10 segundo de duração do carregamento repetido. Para manter a temperatura controlada, na maioria dos casos, utiliza-se uma câmara com sistemas de aquecimento e refrigeração ligados a um termostato.

Para cada mistura ensaiada determinam-se as relações entre o número de ciclos de fadiga e relações entre tensões atuantes:

$$N = K_1 \left( \frac{1}{\sigma_t} \right)^{n^1} \quad \text{Equação 2.5}$$

$$N = K_2 \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n^2} \quad \text{Equação 2.6}$$

Onde:

$N$  = número de repetições do carregamento necessário à ruptura completa da amostra (vida de fadiga);

$\sigma_i$  = tensão de tração repetida solicitante;

$\Delta\sigma$  = diferença algébrica entre as tensões horizontal (de tração) e vertical (de compressão) no centro da amostra (Figura 2.16);

$k_i, n^i$  = constantes obtidas na regressão linear dos pares  $N$  e  $\sigma_i$  (ou  $\Delta\sigma$ ) determinados em ensaios, em escalas logarítmicas.

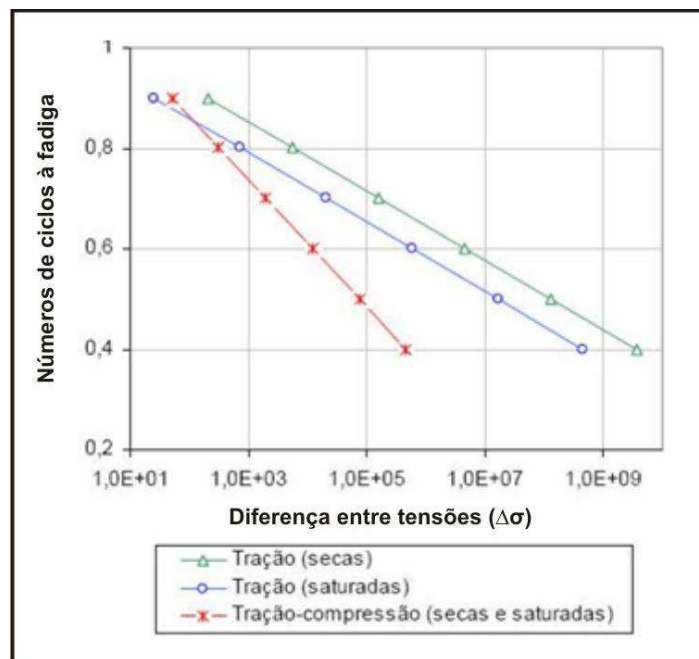


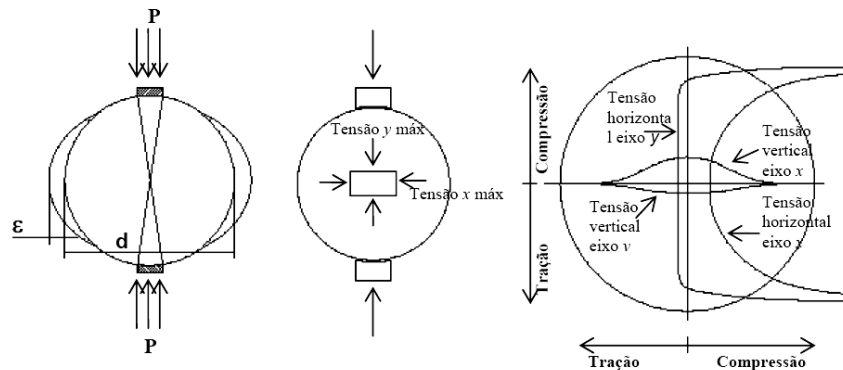
Figura 2.16 - Vida de Fadiga considerando diferentes faixas granulométricas [Fonte: CERVO, 2004]

O ensaio de fadiga tem sido usado mais comumente para fins de comparação entre misturas. Contudo, mesmo nesse caso, é preciso cautela para uma conclusão direta somente a partir das curvas, pois o estado de tensões gerado em cada situação depende da estrutura e do valor do MR das camadas constituintes dos pavimentos (MOTTA, 1991; PINTO, 1991; MEDINA, 1997).

#### 2.7.4 Ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral

O ensaio de tração indireta por compressão diametral, também conhecido como “ensaio brasileiro”, foi desenvolvido por *Lobo Carneiro* em 1943, com a finalidade de determinar a Resistência à Tração de corpos de prova de concreto de cimento *Portland* por solicitações estáticas.

No ensaio de resistência à tração por compressão diametral, o corpo-de-prova cilíndrico é posicionado diametralmente em relação à direção de compressão, resultando em uma tração, agindo perpendicularmente ao longo do plano diametral que promove a ruptura da amostra nesta direção. Pode ser realizado em uma prensa simples de CBR. O corpo de prova é apoiado ao longo de duas geratrizes por dois frisos de carga posicionados na parte superior e inferior do corpo de prova. Em misturas asfálticas, realiza-se o ensaio de acordo com a norma ME 138/94 do DNIT. A figura 2.17 apresenta o estado de tensões que ocorre durante o ensaio.



**Figura 2.17 – Estado de tensões gerado durante o ensaio de tração por compressão diametral**

[Fonte: ROHDE (2007)]

Falcão e Soares (2002) verificaram que para diferentes larguras de frisos a Resistência a Tração (RT) apresentou valores variados, e com auxílio de observações dos ensaios de RT e simulações numéricas, os autores apontaram possíveis influências das tensões de cisalhamento sobre o valor da força máxima aplicada pela prensa (P), gerando um incremento dos valores destas com a diminuição da largura dos frisos.

### 2.7.5 Ensaio de Lottman Modificado

O ensaio de Lottman, também conhecido como ensaio de “dano por umidade induzida”, é utilizado para avaliar a variação da propriedade mecânica da mistura asfáltica, em termos de resistência a tração (RT), sob a ação deletéria da água em ciclos de temperaturas intermediárias e baixas.

O ensaio de dano por umidade induzida tem importância reconhecida nas especificações de alguns tipos especiais de misturas SMA (*Stone Matrix Asphalt*), CPA (*Camada Porosa de Atrito*) e CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente), para as quais o ensaio *Lottman* faz parte do projeto AASHTO (2001), Watson et al. (2002) e apud Magalhães (2004). O ensaio é utilizado por engenheiros e técnicos dos Departamentos de Transportes dos Estados Unidos (Department of Transports - DOTs) e pelo meio acadêmico brasileiro.

De acordo com Furlan et al. (2004) o principal ensaio utilizado na avaliação dos danos por umidade das misturas asfálticas é o ensaio de Tração por Compressão Diametral. Ainda, segundo os autores, esta

importância é justificável por ele refletir o esforço ao qual a película de asfalto é submetida quando deslocada/arrancada e por também apresentar sensibilidade suficiente para diagnosticar variações na resistência ou perdas de coesão da mistura.

Hicks (1991) enumera quatro fatores que influenciam o dano por umidade, a saber:

- as características da Mistura Asfáltica, abrangendo o agregado (textura superficial, porosidade, composição mineralógica, composição química da superfície, umidade superficial e recobrimento), o cimento Asfáltico e o tipo de mistura;
- as condições climáticas (temperatura, vento, umidade), durante a construção;
- os efeitos ambientais (clima e carregamento do tráfego), após a construção;
- drenagem sub-superficial do pavimento.

Segundo o procedimento preconizado pela AASHTO T 283/99, o ensaio de susceptibilidade de misturas asfálticas à presença d'água ou dano por umidade induzida pode ser realizado para prever, por um período de quatro até doze anos, a susceptibilidade da mistura ao descolamento da película asfáltica do agregado (stripping: perda de adesividade), considerando o efeito deletério da água, e avaliar a necessidade de usar um aditivo para melhoria da adesividade (dope). Os corpos de prova cilíndricos para esse ensaio podem ser preparados em laboratório ou serem extraídos da pista e devem ter diâmetro de 101,6 mm (4") e altura de 63,5 mm (2,5") ou 150 mm de diâmetro (6") e altura de 95 mm (3,75") com teor de vazios de  $7\pm 1\%$  ou o teor esperado no campo.

De uma forma simplificada, no ensaio *Lottman Modificado*, os corpos de prova são divididos em dois grupos, onde um é rompido à tração (sem condicionamento) e o outro também sofre a ruptura após ciclos de gelo e degelo (com condicionamento). O potencial de dano por umidade é indicado pela Relação da Resistência à Tração (RRT), dada pela divisão da resistência à tração do grupo condicionado e a resistência à tração do grupo de controle. A metodologia desenvolvida pelo projeto SUPERPAVE estabelece que o valor de RRT deve ficar acima de 80%, enquanto a MP 8-01 da ASSHTO estabelece o limite mínimo de 70%. A Figura 2.18 e a Figura 2.19 apresentam informações e equipamentos para realização do ensaio.



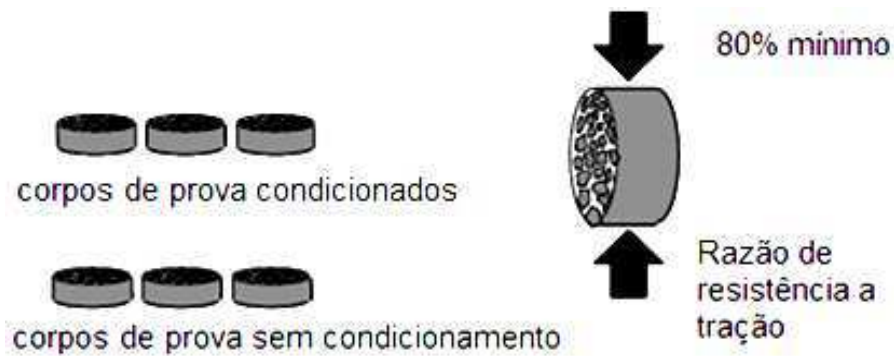


Figura 2.18 – Informações para o ensaio de Lottman [Fonte: TANDON et al. (2003)].



Figura 2.19 – Dissecador e bomba a vácuo utilizados na saturação dos corpos de prova [Fonte: LEP/UAEC/UFCG]

## 2.8 Engenharia de Software

De acordo com Filho (2000) a definição de Engenharia é conexa, porém distinta. O autor analisa cada uma de suas partes, tentando interpretá-las em termos da Engenharia de Software, e reordenando-as para fins explicativos:

Arte – “capacidade que tem o homem de pôr em prática uma ideia, valendo-se da faculdade de dominar a matéria”. Na Engenharia de Software, a matéria dominada consiste em máquinas de processamento da informação configuradas e programadas.

Atendimento das necessidades humanas – Todo produto de engenharia se justifica através da satisfação de uma necessidade. A Engenharia de Software procura gerar valor através dos recursos de processamento de informação.

Conhecimentos científicos – parte dos métodos da Engenharia de Software provém da Ciência da Computação.

Conhecimentos empíricos – Outra parte dos métodos da engenharia provém da experiência prática, e não apenas da pesquisa científica. Na Engenharia de Software, muitas práticas são adotadas porque funcionam, mesmo quando ainda carecem de fundamentação teórica satisfatória.

Habilitações específicas – A Engenharia de Software possui um conjunto de habilitações específicas, ou disciplinas, que se relaciona com o conjunto das disciplinas da Ciência da Computação, mas não se confunde com elas.

Recursos naturais – Os recursos naturais da Engenharia de Software são as máquinas de tratamento da informação. A Ciência da Computação se ocupa de abstrações como os algoritmos e as estruturas de dados; a Engenharia de Software usa estas abstrações, desde que sejam realizáveis na prática, através da tecnologia existente em determinado momento.

Formas adequadas – Para satisfazer às necessidades humanas, os recursos naturais devem ser convertidos em formas adequadas. Na Engenharia de Software, estas formas são os programas de computador.

Dispositivos e estruturas – O desafio do engenheiro de software é escolher e montar as estruturas de grande complexidade que a programação dos computadores permite realizar.

Processos – A engenharia segue processos, que são “maneiras pelas quais se realiza uma operação, segundo determinadas normas”. O método da engenharia se baseia na ação sistemática, e não na improvisação.

### **2.8.1 Processos de desenvolvimento de software**

A grande procura por sistemas que capazes de automatizar e simplificar atividades diárias das organizações tem ajudado no crescimento exponencial da indústria de desenvolvimento de software. Porém, para suprir esse mercado não basta apenas obter mão de obra qualificada e ferramentas que auxiliem o desenvolvimento de software, também é preciso definir possíveis metas para alcançar os objetivos desejados.

Tendo em vista esta preocupação, surgiu o conceito de processo de desenvolvimento de software, que, segundo Sommerville (2006) um processo de software é um conjunto de atividades que leva à produção de um produto de software. Essas atividades podem envolver o desenvolvimento de software propriamente dito e cada vez mais, no entanto, o novo software é desenvolvido como uma ampliação ou manutenção de sistemas já existentes.

O processo de desenvolvimento de software é formado por um conjunto de passos parcialmente ordenados relacionados com conjuntos de artefatos, pessoas, recursos, estruturas organizacionais e restrições,

tendo como objetivo produzir e manter os produtos de software requeridos (LONCHAMP, 1993; DOWSON et al., 1991).

## 2.8.2 Modelos de desenvolvimento de software

Foi visto que ao utilizar processos de desenvolvimento, o desenvolvedor aumenta a probabilidade de obter produtos de alta qualidade, através da organização e sistematização das tarefas. Devido ao caso do procedimento adotado codificar e depois corrigir, depois de algumas correções o código perderia a estrutura. Este é o argumento para uma fase de projeto (design) anterior à de codificação. A fase de análise de requisitos é anterior à de design para que o software esteja adequado ao usuário.

### Modelo Cascata

O modelo Cascata ou Waterfall, apresentado por Royce (1970) para o desenvolvimento de grandes sistemas de software, representou uma mudança de paradigma em relação à abordagem análise-programação. Neste modelo estão definidas fases de desenvolvimento.

O Modelo em Cascata foi primeiro a ser publicado e segundo Sommerville (2003) é o mais antigo. Como apresentado em Beck (1999) para um sistema onde os requisitos não mudam, esse paradigma atende de forma satisfatória, porém para ambientes onde mudanças são constantes, ou mesmo, quando o usuário não tem clareza nos requisitos, esse paradigma acaba por frustrar o usuário do produto desenvolvido, que após um longo período aguarda pelo software que, ao final, pode não atender suas necessidades, devido à dinâmica de mudanças nos processos e procedimentos das empresas. A Figura 2.20 demonstra o processo em cascata.

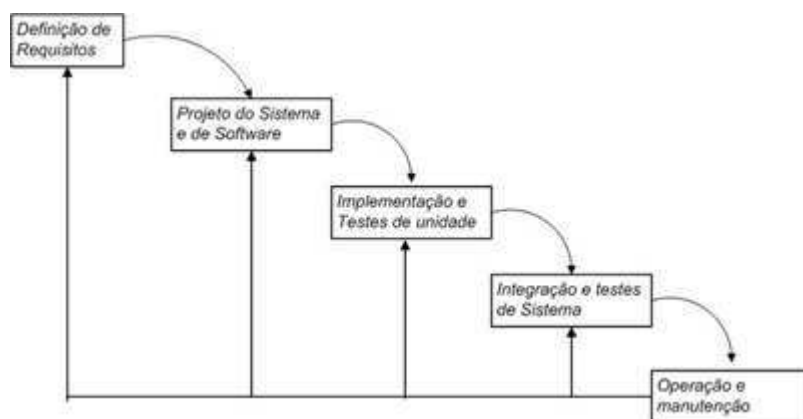


Figura 2.20 - Modelo em Cascata [Fonte: Sommerville (2003)]

## “Prototipação”

Este tipo de modelo é utilizado quando o cliente não tem todos os requisitos bem definidos. Pernin (1996) protótipo é um modelo operacional, modificável e extensível de um sistema, porém não necessariamente representativo do sistema completo, e que fornece aos usuários da aplicação final uma representação física dos principais aspectos do sistema de sua implementação.

Pfleeger (2001) apresenta a vantagem de encontrar discrepâncias nos requisitos antes da chegada de fases mais custosas através do uso de *prototipação*, mas Pressman (2001) apresenta algumas limitações:

- Pressão do cliente, ao ver que existe algo funcionando, sobre o desenvolvedor para colocar em produção como está;
- O próprio desenvolvedor acaba por esquecer o propósito do protótipo e mantém o código feito às pressas e sem boa definição de arquitetura.

A Figura 2.21 demonstra o processo de prototipagem.

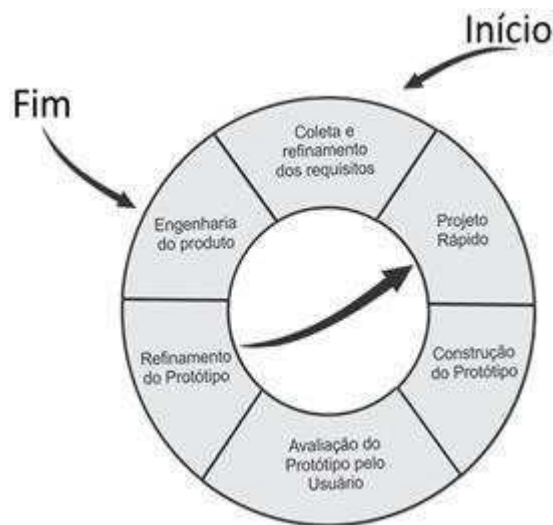


Figura 2.21 - Modelo de protótipo

## Modelo Espiral

Proposto por Boehm (1998) o modelo espiral é orientado pelos riscos (risk-driven), ao invés de orientado por documentação e código. Segundo o autor o modelo tem a vantagem de se adaptar aos diferentes tipos de riscos envolvidos no projeto (relacionados a orçamento, prazos, interface com usuário e patamares de

desempenho); tem alta capacidade de eliminar erros e identificar alternativas equivocadas logo no início e estabelece critérios claros para passar para outra fase.

O modelo espiral adiciona uma novidade aos modelos em cascata e de *prototipação*, este possui uma fase de avaliação de risco a cada laço no espiral, como pode ser visto na Figura 2.22.

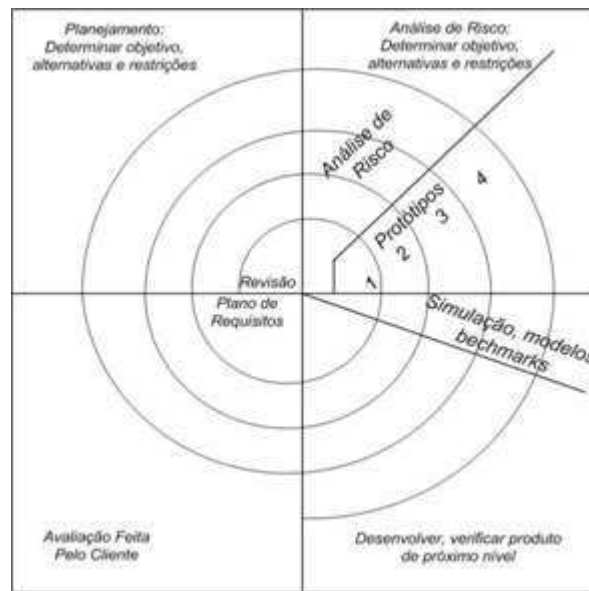


Figura 2.22 - Modelo espiral [Fonte: Boehm (1998)]

### Extreme Programming (XP)

A *eXtreme Programming* (XP) é mais que um simples ciclo e de vida, mais que uma metodologia de desenvolvimento de softwares. Foi um dos Métodos Ágeis que mais recebeu atenção na virada do século. Ela é baseada em pessoas, abandonando os princípios em que as pessoas são peças dentro do processo, as pessoas são e fazem o processo, sendo assim as características são reavaliadas, passando a ser uma série de conceitos e princípios que se adotados vão direto ao objetivo do desenvolvimento de softwares, a produção rápida e segura, tendo sempre uma versão funcional da aplicação e uma melhor visão do conjunto final.

O XP possui quatro valores, que norteiam os praticantes dessa metodologia, como apresentado em seguida (BECK, 2004):

- Comunicação: apresenta a necessidade dos participantes do projeto terem melhores formas de comunicação e argumenta sobre os problemas de projetos, nos quais programador, cliente e gerente de projetos não conseguem estar alinhados a respeito do projeto e que as práticas acabam por reforçar essa comunicação.

- Simplicidade: como não programar pensando em possíveis necessidades futuras? É aí que a simplicidade entra: programar para o que é necessário apenas, não tentar fazer algo para o futuro, pois no futuro o requisito pode mudar e o esforço ser inútil.

- Feedback: o feedback é muito importante para o projeto XP. Aparece nos testes de unidade em que o feedback é imediato, os programadores sabem ou não que uma determinada classe funciona e já estão a postos para realizar as alterações necessárias.

- Coragem: este princípio é percebido no momento de verificar que algo tem que ser abandonado ou refatorado, quando a equipe decide jogar o código fora e começar do zero.

## 2.9 Programação Java

Segundo Claro e Sobral (2008) Java é a linguagem de programação orientada a objetos, desenvolvida pela Sun Microsystems, capaz de criar tanto aplicativos para desktop, aplicações comerciais, softwares robustos, completos e independentes, aplicativos para a Web. Além disso, caracteriza-se por ser muito parecida com C++, eliminando as características consideradas complexas, dentre as quais ponteiros e herança múltipla.

Em 1991, um pequeno grupo de funcionários da Sun incluindo James Gosling mudou-se para a San Hill Road, uma empresa filial. Este grupo percebeu que não poderia ficar preso as plataformas, pois os clientes não estavam interessados no tipo de processador que estavam utilizando e fazer uma versão do projeto para cada tipo de sistema seria inviável. Desenvolveram então o sistema operacional GreenOS, com a linguagem de programação Oak. Eles se basearam no inventor do Pascal, através da linguagem Pascal, que foi o pioneiro da linguagem intermediária ou máquina virtual.

Em 1993, surgiu uma oportunidade para o grupo Green, agora incorporado como FirstPerson a Time-Warner, uma empresa que estava solicitando propostas de sistemas operacionais de decodificadores e tecnologias de vídeo sob demanda. A FirstPerson apostou nos testes de TV da Time-Warner, mas esta empresa preferiu optar pela tecnologia oferecida pela Silicon Graphics.

Depois de mais um fracasso, a FirstPerson dissolveu-se e metade do pessoal foi trabalhar para a Sun Interactive com servidores digitais de vídeo. Entretanto, a equipe restante continuou os trabalhos do projeto na Sun. Apostando na Web surgiu a ideia de criar um browser com independência de plataforma, que foi o HotJava.

Como a equipe de desenvolvimento ingeria muito café enquanto estavam trabalhando, várias xícaras de café foram inseridas até que o projeto estivesse pronto. Finalmente em maio de 1995, a Sun anunciou um ambiente denominado Java (homenagem às xícaras de café) que obteve sucesso graças a incorporação deste ambiente aos navegadores (browsers) populares como o Netscape Navigator.

A Sun considera o sucesso do Java na Internet como sendo o primeiro passo para utilizá-lo em decodificadores da televisão interativa em dispositivos portáteis e outros produtos eletrônicos de consumo – exatamente como o Java tinha começado em 1991. A primeira versão da linguagem Java foi lançada em 1996.

Segundo Silva (2007) Java tem uma neutralidade em relação a plataforma, isto é motivo de grande interesse pela linguagem. Outras linguagens, como C ou Pascal, exigem a recompilação do código fonte toda vez que se precisa migrar de plataforma. No caso de Java, o mesmo código já compilado pode executar em mais de uma plataforma sem a necessidade de alterações do código fonte e recompilação.

Java consegue esse prodígio usando uma máquina virtual independente de plataforma, a qual permite que um sistema desenvolvido, por exemplo, em um computador Intel com Microsoft Windows possa executar sem modificações em uma máquina Sparc usando o sistema operacional Linux.

Silva (2007) cita as características da Linguagem Java como sendo:

- Ser orientada a objetos;
- Ser distribuída. Java foi uma linguagem projetada desde o início para computação distribuída em uma rede heterogênea de computadores. Este é um fato que justifica o grande uso de Java com o advento da Internet;
- Ser ao mesmo tempo compilada e interpretada. Os programas fonte em Java (extensão.java) são compilados para um formato binário de código conhecido como bytecode (extensão .class) que é independente de plataforma. O bytecode será então executado em outra máquina de forma interpretada;
- Dispor de compiladores os quais identificam pontos do programa mais executados (hotspots) e compilam para código nativo, o que acelera a execução do programa e os torna quase tão rápidos quanto programas escritos na linguagem C/C++;
- Ser uma linguagem neutra em relação à arquitetura, o que garante portabilidade entre plataformas;
- Ser multitarefa. Java suporta o conceito de threads permitindo a execução simultânea de diversos segmentos de código;
- Ser dinâmica. A ligação (linking) do programa com as bibliotecas de terceiros são executadas dinamicamente, ao contrário de outras linguagens que precisam ser ligadas estaticamente;
- Ser segura. Devido à característica distribuída de Java, ela foi pensada para incorporar diversos recursos de segurança, raramente encontrada em outras linguagens. Podem se especificar quais permissões de acesso o programa em Java terá em relação à rede ou disco rígido;

- Ser simples quando comparada a C++. A linguagem Java apesar de ser derivada da linguagem C++, evitou características problemáticas dessa linguagem que causavam confusão e falta de legibilidade como, por exemplo, herança múltipla;

- Ser compacta. A maioria das máquinas virtuais e programas em Java ocupam pouco espaço de memória. Isso permite que Java possa funcionar em máquinas com poucos recursos como celulares e palmtops;

- Ter alto desempenho. O emprego de compiladores just in time (JIT), permite a compilação de partes críticas do código (hotspots) e alcançar velocidades de execução próximas a linguagens compiladas como C.

A Figura 2.23 mostra uma tela com um exemplo de programação em linguagem Java.

```
private void jButtonCurvaAG2ActionPerformed(java.awt.event.ActionEvent evt) {  
    // TODO add your handling code here:  
    tabAGVazia = false;  
    String stringTable;  
    Double[] vetorDados = new Double [10];  
    for (int i = 0; i <= 9; i++) {  
        stringTable = (String) jTableAG2.getValueAt(i, 1);  
        if (jTableAG2.getValueAt(i, 1) == null || stringTable.trim().equals("")) {  
            tabAGVazia = true;  
            vetorDados[i]=0.0;  
        }else{  
            vetorDados[i] = Double.parseDouble(stringTable);  
        }  
    }  
  
    if (tabAGVazia == true) {  
        JOptionPane.showMessageDialog(null, "Preencha a tabela de valores por completo", null, JOptionPane.ERROR_MESSAGE);  
    } else {  
  
        GraficosLineChartAG demo = new GraficosLineChartAG(String.valueOf(jComboBoxBrita2.getSelectedItem()));  
        ChartPanel chartPanel = new ChartPanel(demo.createChart(demo.createDataset(vetorDados)));  
        chartPanel.setPreferredSize(new Dimension(350, 240));  
  
        //JPanel JPanel1CI = new JPanel();  
        JPanelAG2.removeAll();  
        JPanelAG2.add(chartPanel);  
        JPanelAG2.revalidate();  
        JPanelAG2.repaint();  
        jScrollPaneGrafico2.setViewportViewView(JPanelAG2);  
    }  
}
```

Figura 2.23 –Tela com um exemplo de Programação Java



# CAPÍTULO 3

---

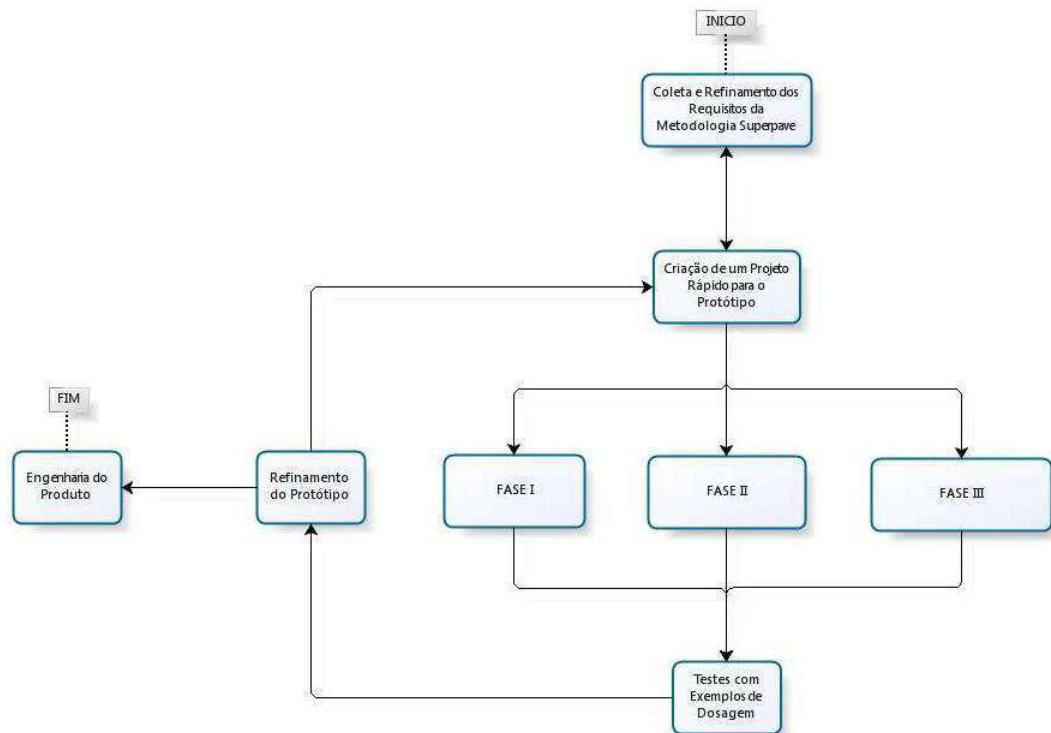
## 3. METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os procedimentos utilizados durante a fase experimental da pesquisa. Para o desenvolvimento do SOFTPAVE foi utilizado o modelo de desenvolvimento de *Prototipação* tendo em vista que ao iniciar esta pesquisa não se tinha todos os requisitos bem definidos, então foi necessário usar um modelo operacional, modificável e extensível, porém não necessariamente representativo do sistema completo, e que fornecesse aos usuários da aplicação final uma representação física dos principais aspectos do sistema de sua implementação.

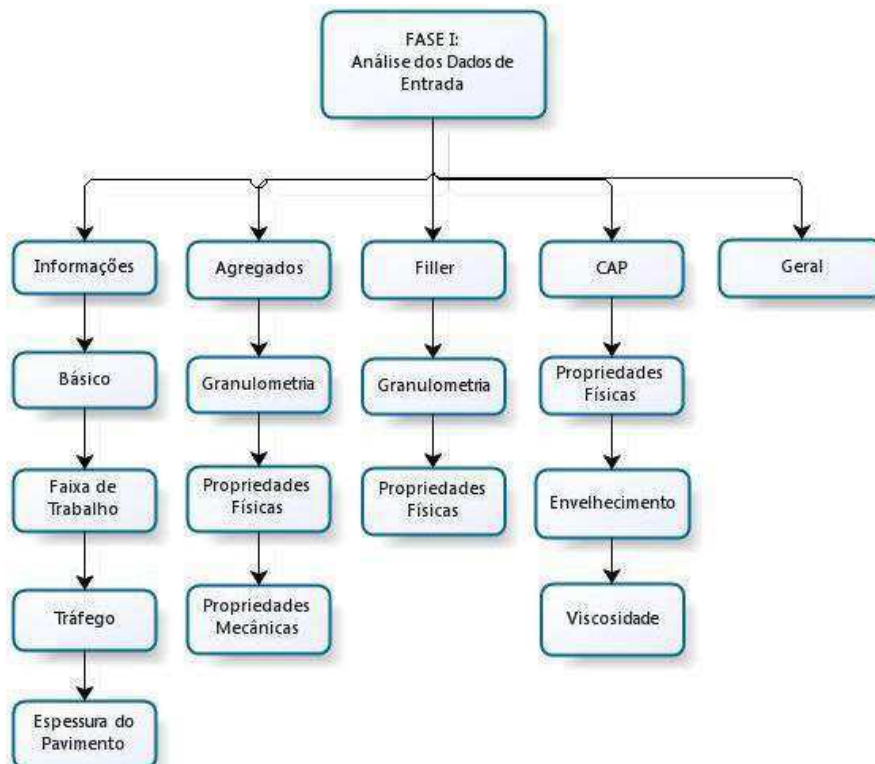
O Fluxograma 3.1 representa a aplicação do modelo de Prototipação no desenvolvimento do SOFTPAVE. Inicialmente é feita a coleta e o refinamento dos requisitos da metodologia SUPERPAVE. O estudo do tema por partes e a definição dos requisitos destas partes, logo após é criado um projeto rápido para o protótipo que por sua vez pode passar pela Fase I, Fase II ou Fase III (descritas mais adiante). Após as implementações dos requisitos foram feitos testes para confirmar se o protótipo atingiu os objetivos requeridos. Seguindo, o protótipo foi refinado e a partir deste ponto pode seguir a finalização na engenharia do produto ou repetir o ciclo de desenvolvimento até que o protótipo fosse aceito.

O Fluxograma 3.2 descreve os itens que foram implementados na Fase I definida como Análise dos Dados de Entrada. Esta fase representa toda a inserção dos dados de projeto necessários para que a Fase II e Fase III possam ser executadas sem problemas.

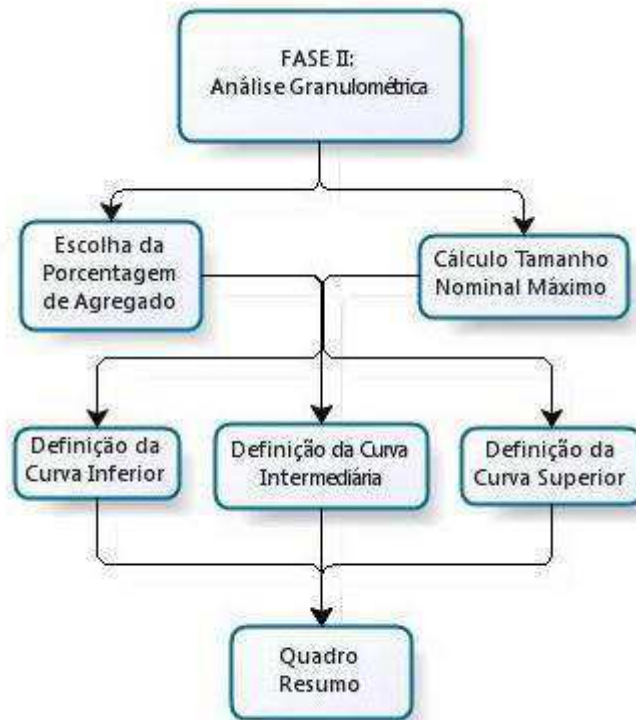
O Fluxograma 3.3 descreve os itens que foram implementados na Fase II definida como Análise Granulométrica. Esta fase representa a definição da granulometria correta para definição das curvas inferior, intermediária e superior. Esta fase é necessária para que Fase III possa ser executada sem problemas.



Fluxograma 3.1 - Sequência de atividades realizadas na fase experimental do desenvolvimento da ferramenta

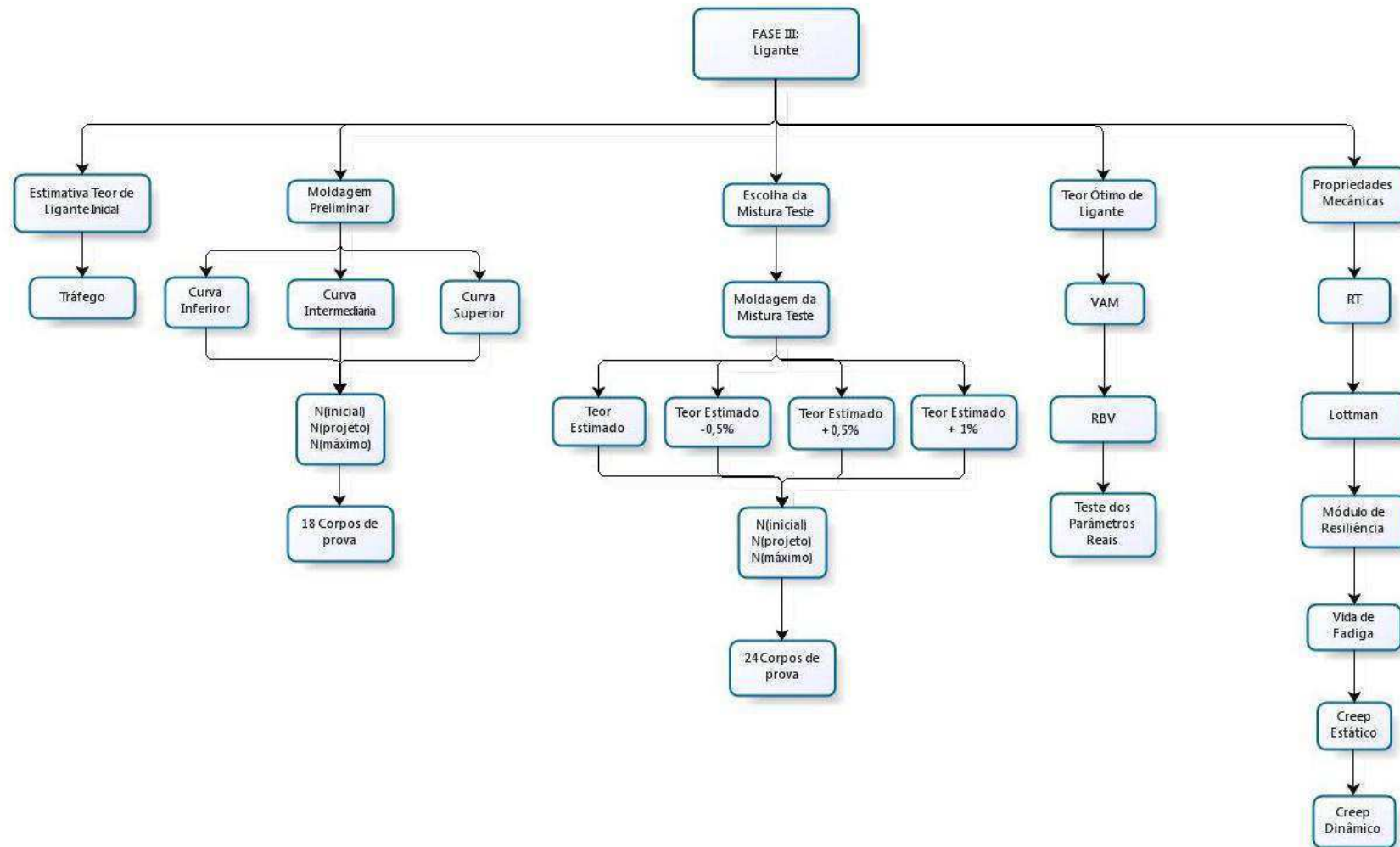


Fluxograma 3.2 - Fase I: sequência de atividades (Análise dos dados de Entrada)



**Fluxograma 3.3 - Fase II: sequência de atividades (Análise Granulométrica)**

O Fluxograma 3.4 descreve os itens que foram implementados na Fase III definida como Ligante. Esta fase representa a definição do teor ótimo de ligante através das moldagens dos corpos de provas, além de testar se as propriedades dos corpos de prova moldados com este teor ótimo serão aceitas. Esta fase finaliza o projeto de dosagem SUPERPAVE.



Fluxograma 3.4 - Fase III: sequência de atividades (Ligante)

# CAPÍTULO 4

---

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O SOFTPAVE é uma ferramenta computacional para o cálculo da dosagem de misturas asfálticas pelo Método SUPERPAVE, tendo como objetivo chegar a estimativa de um teor ótimo de projeto que atenda aos requisitos preconizados pelo método de dosagem.

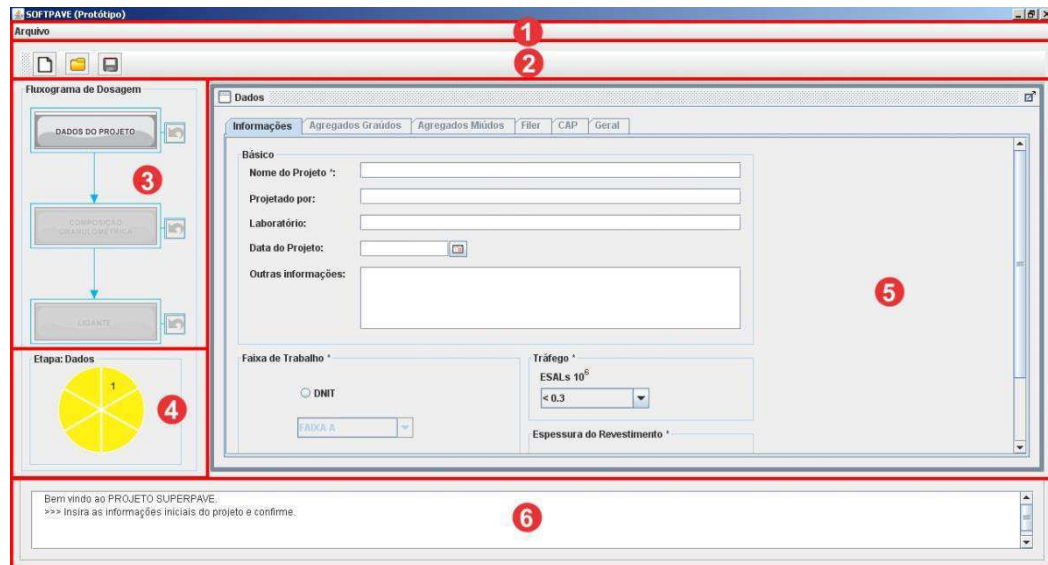
Requisitos do sistema para uso do SOFTPAVE:

- Uso de mouse e teclado;
- Sistema operacional mínimo: Windows® XP;
- Resolução ideal: 1366 x 768;
- Instalação do JDK (Java Development Kit);
- Tamanho em disco: 45 MB.

A seguir serão descritos em detalhes os resultados obtidos com as etapas sugeridas no método de trabalho constante no Capítulo 3 - Materiais e Métodos. O software possui aproximadamente 40.000 linhas de código, geradas manualmente e automaticamente, foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação JAVA e o ambiente de desenvolvimento utilizado foi o Netbeans IDE 7.1.1.

## 4.1 Apresentação da Interface

A Tela 1 apresenta a janela de trabalho do software que por sua vez está dividida em 6 áreas que são detalhadas a seguir.



Tela 1 – Interface principal

A área 1 é a barra de “menu” que contém o “menu” Arquivo com os seguinte “submenus”: criar novo projeto, abrir projeto já existente e salvar como PDF (Tela 2).



Tela 2 – “Menu”

### Arquivo

A área 2 é a barra de ferramentas que oferece atalhos para os itens do menu Arquivo e contém os ícones de criar novo projeto, abrir projeto já existente e salvar como PDF.

A área 3 apresenta o Fluxograma de dosagem SUPERPAVE que por sua vez é dividido em 3 etapas: Dados de Projeto, Composição Granulométrica e Ligante. O objetivo deste fluxograma que é manipulado durante a execução do projeto é de orientar em que etapa de projeto o usuário está.

A área 4 é o relógio de fases do software, este relógio apresenta o número de fases que cada etapa do fluxograma contém, além de mostrar o posicionamento do usuário a medida que este avança no projeto.

A área 5 é área de trabalho propriamente dita do software tendo em vista que todas as inserções de dados, manipulações de gráficos e análises do comportamento da dosagem serão vistos nessa área. Esta região do software respeita a sequência de dosagem proposta pelo fluxograma de dosagem.

A área 6 é a área de retorno do software tendo em vista que esta avisa ao usuário o que ele deve fazer a medida que este avança nas telas da área de trabalho do software.

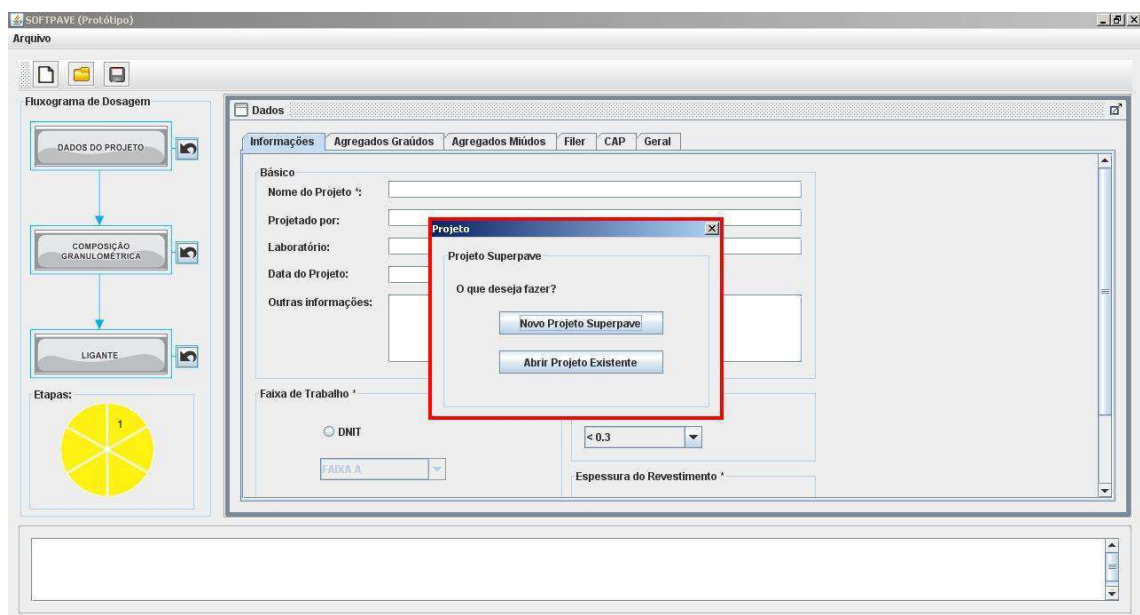
## 4.2 Exemplo de um projeto de dosagem SUPERPAVE “passo a passo”

Ao iniciar o SOFTPAVE é aberta uma tela de apresentação (Tela 3) que por sua vez exibe informações sobre a pesquisa desenvolvida, órgãos públicos de ensino envolvidos, financiamento, entre outros. Esta tela de apresentação dura alguns segundos para que o usuário possa ler as informações contidas nela.



Tela 3 – Apresentação do software

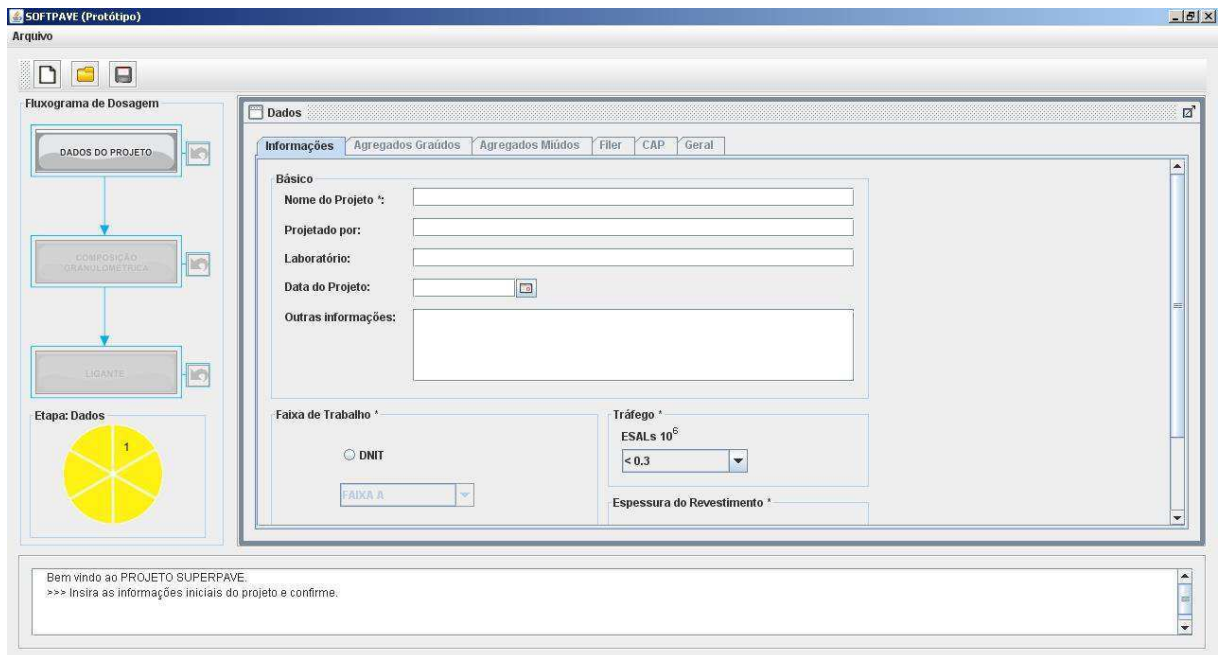
Posteriormente é aberta a interface do software com uma tela de escolha de um novo projeto (Tela 4) que deve ser resolvida para prosseguimento da dosagem. O início de um novo projeto é feito ao clicar no botão “Novo Projeto Superpave”, caso o usuário deseje abrir um projeto existente o clique deve ser no botão “Abrir Projeto Existente” que por sua vez abre a tela de escolha de um algum arquivo existente que seja suportado pelo software.



Tela 4 – Abertura ou criação de novo projeto



Ao clicar no botão “Novo Projeto Superpave” da Tela 4 será aberta a janela de inicialização do projeto mostrada na Tela 5. É possível perceber que esta tela trava a segunda e terceira etapa do fluxograma de dosagem e as abas posteriores a aba Informações da tela de Dados existente na área de trabalho, além de vários botões e campos de textos que são travados para início da dosagem. Este recurso evita que o usuário avance para etapas posteriores sem completar etapas iniciais importantes. A medida que este avança os componentes são destravados, tendo em vista a inserção correta dos dados.



**Tela 5 – Iniciando um novo projeto**

A Tela 6 apresenta a inserção dos dados básicos da aba Informações na área de Dados do Projeto do software. Nesta área é obrigatório inserir o “Nome do Projeto”. Durante todo projeto os campos que conterm asterisco (\*) são todos obrigatório para o prosseguimento da dosagem, se o usuário não inserir estes valores o SOFTPAVE evita, com uma mensagem de erro, que o mesmo prossiga na dosagem.

Básico	
Nome do Projeto *:	Dosagem Superpave
Projetado por:	Alan Barbosa Cavalcanti
Laboratório:	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
Data do Projeto:	02/05/2013
Outras informações:	O objetivo deste projeto é apresentar um exemplo de dosagem para a dissertação de Mestrado.

**Tela 6 – Inserção de dados básicos**

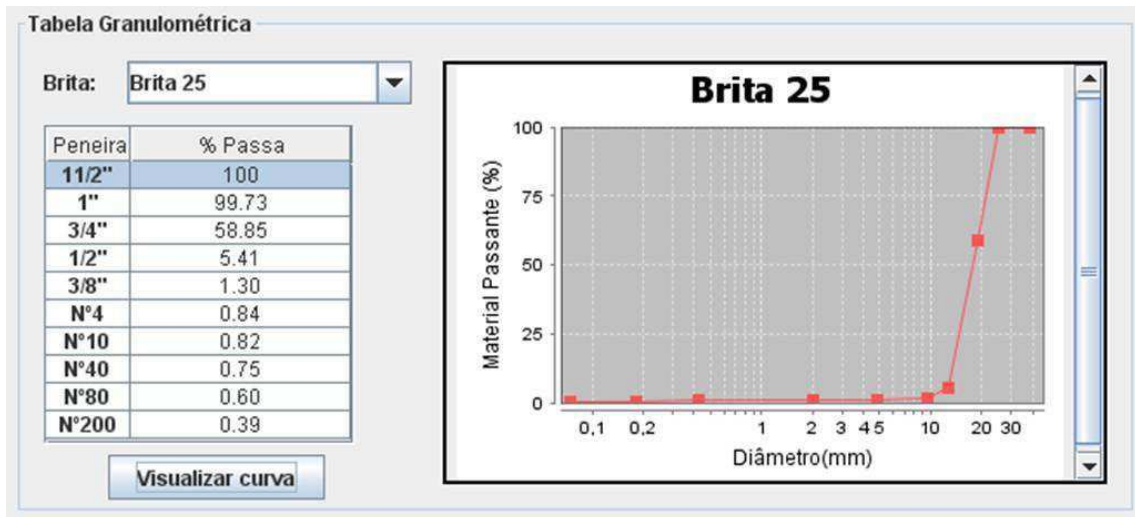
A Tela 7 apresenta a inserção da Faixa de Trabalho do DNIT, o tráfego em ESALs ( $10^6$ ) e a espessura do pavimento, dados obrigatórios para o prosseguimento da dosagem. O N (número equivalente de operações do eixo padrão) é inserido a partir da escolha do ESAL. Neste programa N é adotado como sendo o mesmo valor de ESAL mesmo sabendo que a fórmula de cálculo destes dois índices é diferente.

Tela 7 – Escolha da faixa de trabalho, tráfego e espessura do pavimento

Ao clicar no botão “Confirmar” da Tela 7 será aberta a Tela 8 que possibilita o usuário inserir manualmente os dados dos agregados graúdos existentes na dosagem, além de visualizar sua curva granulométrica, inserir suas propriedades físicas e mecânicas. É possível inserir 5 tipos diferentes de agregados graúdos.

Tela 8 – Inserção de agregados graúdos

A seguir é detalhada a inserção da Brita 25, o procedimento para a Brita 19 e a Brita 12.5 são os mesmo. A Tela 9 apresenta a composição granulométrica da Brita 25. Após a inserção de todos os percentuais é possível visualizar a curva granulométrica.



Tela 9 – Tabela e curva granulométrica do agregado graúdo

A Tela 10 apresenta a inserção das propriedades físicas da Brita 25, tendo em vista que todos os valores satisfazem os critérios propostos. Ao satisfazer os critérios os campos de texto ficaram verde em tempo de execução, ao contrário ficaram vermelhos. O prosseguimento da dosagem só é aceito quando os campos obrigatórios estão dentro dos critérios pré-estabelecidos.

**Propriedades Físicas**

Peso Específico Real <sup>^</sup>: 2.7426 kN/m<sup>3</sup>

Peso Específico Aparente <sup>^</sup>: 2.7191 kN/m<sup>3</sup>

Tamanho Nominal Máximo: 25 mm

Absorção: 0.2 % (≤ 0.3%)

Adesividade:  Satisfaz  Não satisfaz

Índice de Forma: 1 (mínimo 0.5)

Angularidade <sup>^</sup>: 90 %\*\* 80 %\*\*\* (\*\* mínimo de 80.0% / \*\*\* mínimo de 75.0%)

Partículas Alongadas <sup>^</sup>: 5 % (máximo de 10.0%)

\*\* Uma superfície fraturada;  
\*\*\* Duas superfícies fraturadas;

Tela 10 – Propriedades físicas do agregado graúdo

A Tela 11 apresenta a inserção da única propriedades mecânica exibida no software (Abrasão Los Angeles).

**Propriedades Mecânicas**

**Abrasão Los Angeles:** 20 % (≤ 50%)

\* **Dados obrigatórios.**

**Confirmar**

### Tela 11 – Propriedade mecânica para o agregado graúdo

Ao clicar no botão “Confirmar” da Tela 11 será aberta a Tela 12 que possibilita o usuário de inserir ou não mais algum tipo de agregado graúdo. A escolha do botão “Não” resultará no avanço do projeto para inserção dos agregados miúdos. Neste exemplo foi inserido ainda como agregado graúdo a Brita 19 e a Brita 12.5.

**Fluxograma de Dosagem**

DADOS DO PROJETO

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

LIGANTE

Etapa: Dados

**Dados**

Informações Agregados Graúdos Agregados Miúdos Filer CAP Geral

Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Tamanho Nominal Máximo:	25			mm
Absorção:	0.7			% (≤ 0.3%)
Adesividade:				de 75.0%
Índice de Forma:				
Angularidade ':				
Partículas Alongadas ':				
** Uma superfície fraturada;				
*** Duas superfícies fraturadas				

Propriedades Mecânicas

Abrasão Los Angeles:

\* **Dados obrigatórios.**

**Confirmar**

**Projeto**

Projeto Superpave

Deseja inserir mais algum tipo de Agregado Graúdo?

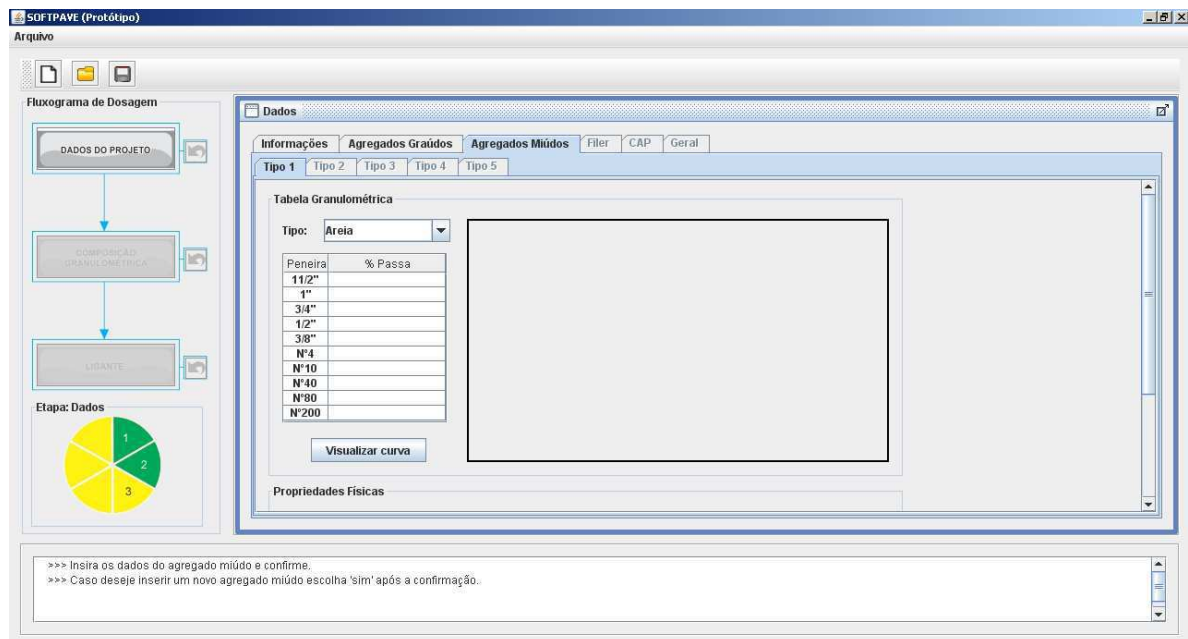
**Sim**

**Não**

>>> Insira os dados do agregado graúdo e confirme.  
>>> Caso deseje inserir um novo agregado graúdo escolha 'sim' após a confirmação.

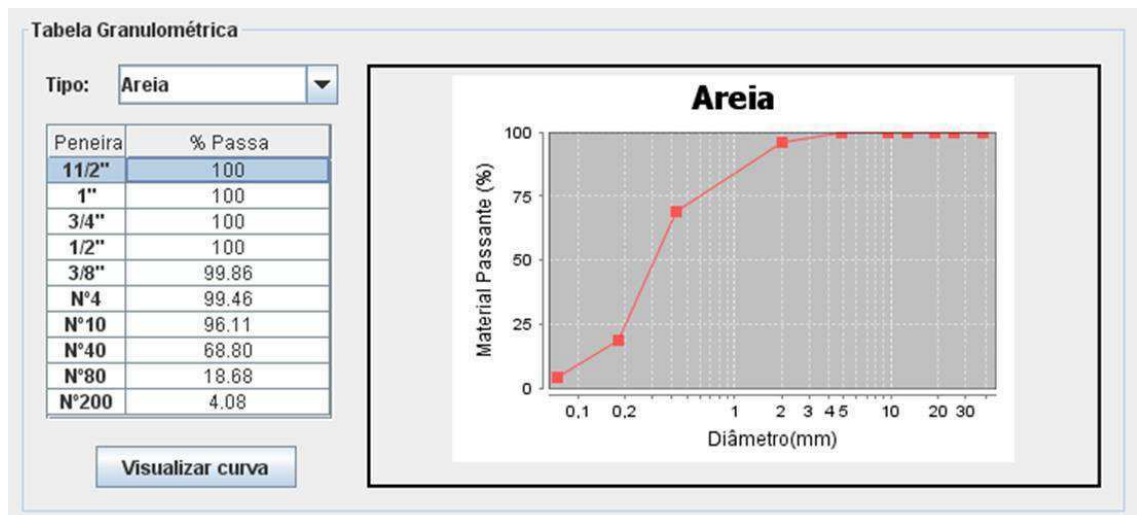
### Tela 12 – Inserção de novo agregado graúdo

Ao inserir todos três agregados graúdos deste exemplo e optar por não inserir mais agregados graúdos será visualizada a Tela 13 que possibilita inserir os dados dos agregados miúdos existentes na dosagem, além de visualizar sua curva granulométrica e inserir suas propriedades físicas. É possível inserir 5 tipos de agregados miúdos.



Tela 13 – Inserção de agregados miúdos

A seguir é detalhada a inserção da Areia, os procedimentos para o Pó-de-pedra são os mesmo. A Tela 14 apresenta a composição granulométrica da Areia. Após a inserção de todas as porcentagens é possível visualizar a curva granulométrica.



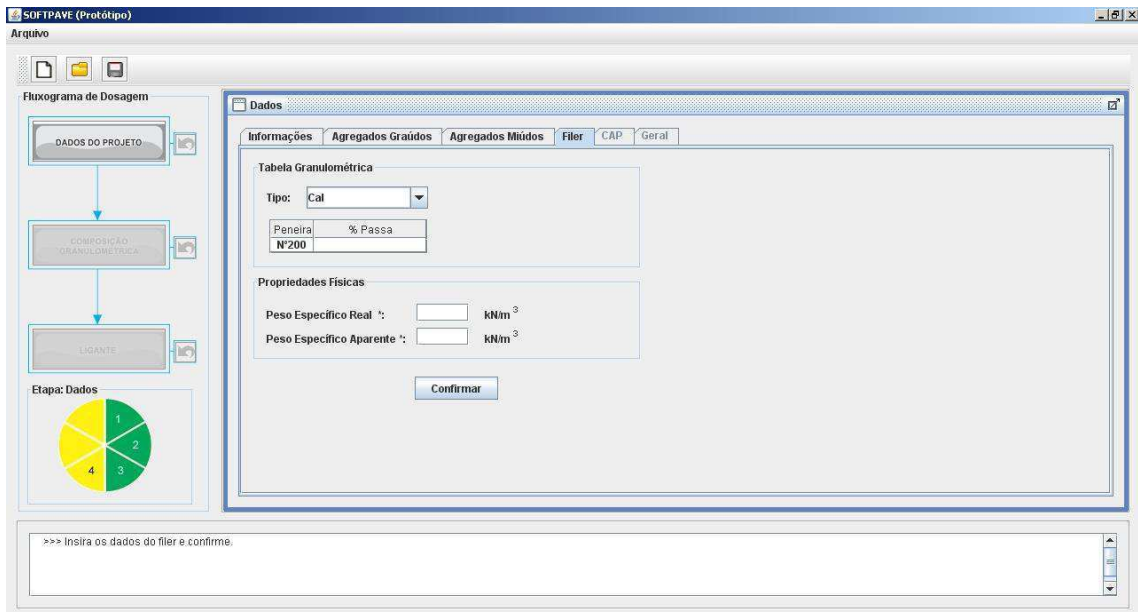
Tela 14 – Tabela e curva granulométrica do agregado miúdo

A Tela 15 apresenta a inserção das propriedades físicas da Areia, tendo em vista que todos os valores satisfazem os critérios propostos.

Propriedades Físicas		
Peso Específico Real ^:	<input type="text" value="2.5433"/>	kN/m <sup>3</sup>
Peso Específico Aparente ^:	<input type="text" value="2.5405"/>	kN/m <sup>3</sup>
Equivalente Areia ^:	<input type="text" value="95"/>	% (mínimo de 45.0%)
Angularidade ^:	<input type="text" value="40"/>	% (mínimo de 40.0%)

**Tela 15 – Propriedades físicas do agregado miúdo**

Ao inserir todos dois agregados miúdos deste exemplo e optar por não inserir mais agregados miúdos será visualizada a tela da Tela 16 que possibilita inserir os dados Filer da dosagem, como sua granulometria e suas propriedades físicas. O filer deste exemplo é a Cal.



**Tela 16 – Granulometria e propriedades físicas do filer**

A Tela 17 apresenta a inserção da percentagem passante do filer na peneira N°200 e suas propriedades físicas. O software não permite a continuidade da dosagem se este material não tiver mais que 65% passante na peneira N°200.

**Tabela Granulométrica**

Tipo:

Peneira	% Passa
N°200	97

**Propriedades Físicas**

Peso Específico Real  $\gamma_s$ :   $\text{kN/m}^3$

Peso Específico Aparente  $\gamma_a$ :   $\text{kN/m}^3$

Tela 17 – Granulometria e propriedades físicas do filer

Ao clicar no botão “Confirmar” da Tela 17 será aberta a Tela 18 que possibilita o usuário de inserir os dados do CAP.

**Dados**

Informações Agregados Grãos Agregados Miúdos Filer CAP Geral

Original

Ponto de Amolecimento:  °C

Ponto de Fulgor:  °C

Massa Específica  $\gamma_s$ :   $\text{g/cm}^3$

Penetração:   $\text{dmm}$

RTFO

Perda de Massa:  % (máximo de 1%)

DSR

Virgem ( $G^*/\text{sen}\theta$ )  $\gamma_s$ :   $\geq 1 \text{ KPa}$

Após RTFO ( $G^*/\text{sen}\theta$ )  $\gamma_s$ :   $\geq 2.2 \text{ KPa}$

Após PAV ( $G^*/\text{sen}\theta$ )  $\gamma_s$ :   $\leq 5000 \text{ KPa}$

>>> Insira os dados do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e confirme  
>>> É necessário gerar pelo menos uma curva de variação referente a algum dos dois tipos de ensaio de viscosidade (Brookfield/Saybolt furo).

Tela 18 – Inserção de dados característicos do CAP

A Tela 19 apresenta a inserção do Ponto de Amolecimento, Ponto de Fulgor, Massa Específica, penetração, Perda de Massa após RTFO, e dos valores da relação  $G^*/\text{sen}\theta$  para o CAP virgem, após RTFO e após PAV.

Original	
Ponto de Amolecimento:	60 °C
Ponto de Fulgor:	250 °C
Massa Específica *:	1.027 g/cm <sup>3</sup>
Penetração:	60 dmm
RTFO	
Perda de Massa:	0.7 % (máximo de 1%)
DSR	
Virgem (G'/senô) *:	1.2 ≥ 1 KPa
Após RTFO (G'/senô) *:	2.5 ≥ 2.2 KPa
Após PAV (G'/senô) *:	1.500 ≤ 5000 KPa

**Tela 19 – Dados do CAP virgem e envelhecido**

A Tela 20 apresenta os valores de “S” e “m” para BBR dentro dos critérios descritos.

BBR	
S:	100 ≤ 300 MPa
m:	0.5 (> 0.3)

**Tela 20 – Valores para BBR**

A Tela 21 apresenta a plotagem dos gráficos de Viscosidade Brookfield e Viscosidade Saybolt Furol. Os dois gráficos calculam automaticamente a “Temperatura do Ligante”, a “Temperatura do Agregado” e a “Temperatura de Compactação”, a partir dos valores em centipoise (cP) obtidos com o viscosímetro Brookfield e os tempos em segundos obtidos com o Saybolt Furol. O SOFTPAVE escolherá a menor “Temperatura do Ligante”. Neste exemplo os dados das duas viscosidades não condizem com o mesmo CAP.



Brookfield	Saybolt-Furol
<input checked="" type="radio"/> Brookfield V1(cP) 447.5    V2(cP) 217.0    V3 (cP) 78.5 <input type="button" value="Gerar Curva de Variação"/>	<input type="radio"/> Saybolt-Furol T1(s) - 135°C 193.0    T2(s) - 150°C 70.0    T3(s) - 177°C 30.0 <input type="button" value="Gerar Curva de Variação"/>
Temperatura do Ligante: 157.74 Temperatura do Agregado: 157.74 até 172.74 Temperatura de Compactação: 145.54	Temperatura do Ligante: 139.23 Temperatura do Agregado: 139.23 até 162.23 Temperatura de Compactação: 152.36
<b>Dados obrigatórios.</b>	
<input type="button" value="Confirmar"/>	

Tela 21 – Viscosidades Brookfield e Saybolt Furol

Ao clicar no botão “Confirmar” da Tela 21 será aberta a Tela 22 correspondente a aba Geral que possibilita o usuário revisar todos dados inseridos até o momento no software. A partir dessa tela o usuário pode modificar os dados inseridos ou clicar no botão “Confirmar Todos os Dados”.

**Fluxograma de Dosagem**

DADOS DO PROJETO

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

LIGANTE

Etapa: Dados

**Dados**

Informações

PROJETO SUPERPAVE

Nome do Projeto = Dosagem Superpave  
 Projetado por = Alan Barbosa Cavalcanti  
 Laboratório = Laboratório de Engenharia de Pavimentos

**Agregado Grosso**

AGREGADO: Brita 25

Granulometria (Porcentagens passantes):  
 11/2" = 100 %  
 1" = 99.73 %  
 3/4" = 99.95 %  
 1/2" = 5.41 %  
 3/8" = 1.30 %  
 Nº4 = 0.84 %  
 Nº10 = 0.82 %  
 Nº40 = 0.75 %

**Agregado Miúdo**

AGREGADO: Areia

Granulometria (Porcentagens passantes):  
 11/2" = 100 %  
 1" = 100 %  
 3/4" = 100 %  
 1/2" = 100 %  
 3/8" = 99.96 %  
 Nº4 = 99.46 %  
 Nº10 = 96.11 %  
 Nº40 = 68.80 %

\*\*\* Nesta etapa são apresentados todos dados de inseridos até o momento.  
 \*\*\* Revise todas informações antes de prosseguir com o projeto superpave.  
 \*\*\* Após a revisão confirme todos os dados.

Tela 22 – Resumo das informações da etapa de Dados do Projeto

A Tela 23, a Tela 24, a Tela 25 e a Tela 26 apresentam todos os dados inseridos deste exemplo e o gráfico com as curvas granulométricas de todos agregados e filer juntas.

**Informações**

PROJETO SUPERPAVE =====

Nome do Projeto = Dosagem Superpave  
 Projetado por = Alan Barbosa Cavalcanti  
 Laboratório = Laboratório de Engenharia de Pavimentos  
 Laboratório = 03/05/2013

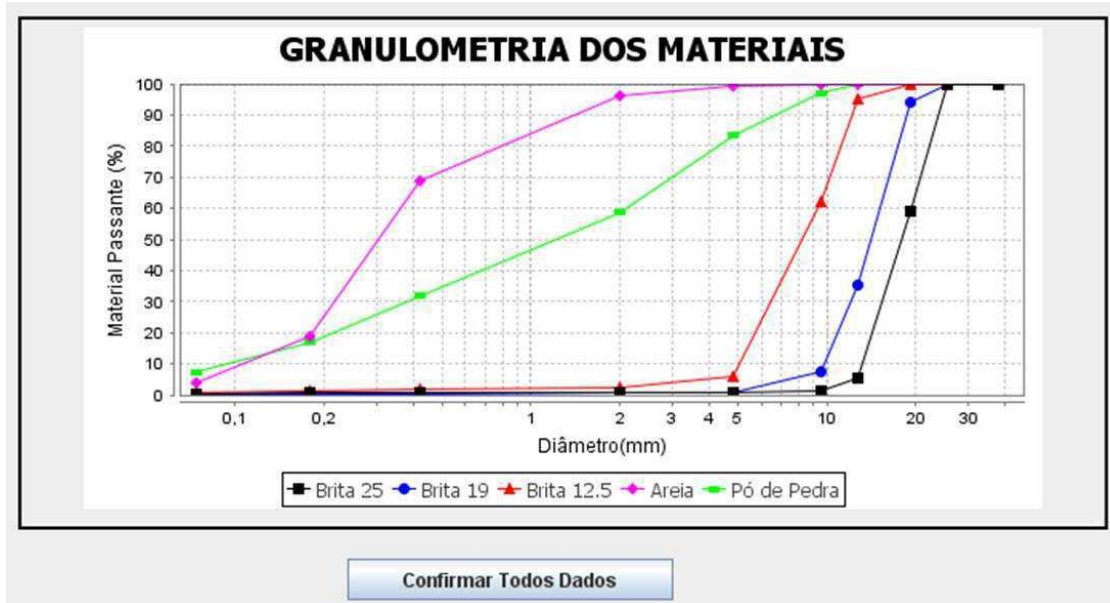
**Tela 23 – Resumo das informações iniciais**

Agregado Graúdo	Agregado Miúdo
<p>AGREGADO: Brita 25</p> <p>Granulometria (Porcentagens passantes):</p> <p>11/2" = 100 %            1" = 99.73 %            3/4" = 58.85 %            1/2" = 5.41 %            3/8" = 1.3 %            N°4 = 0.84 %            N°10 = 0.82 %            N°40 = 0.75 %            N°80 = 0.60 %            N°200 = 0.39 %</p> <p>Peso Específico Real: 2.7426 kN/m<sup>3</sup></p>	<p>AGREGADO: Areia</p> <p>Granulometria (Porcentagens passantes):</p> <p>11/2" = 100 %            1" = 100 %            3/4" = 100 %            1/2" = 100 %            3/8" = 99.86 %            N°4 = 99.46 %            N°10 = 96.11 %            N°40 = 68.80 %            N°80 = 18.68 %            N°200 = 4.08 %</p> <p>Peso Específico Real: 2.5433 kN/m<sup>3</sup></p>

**Tela 24 – Resumo dos dados de agregado graúdo e miúdo**

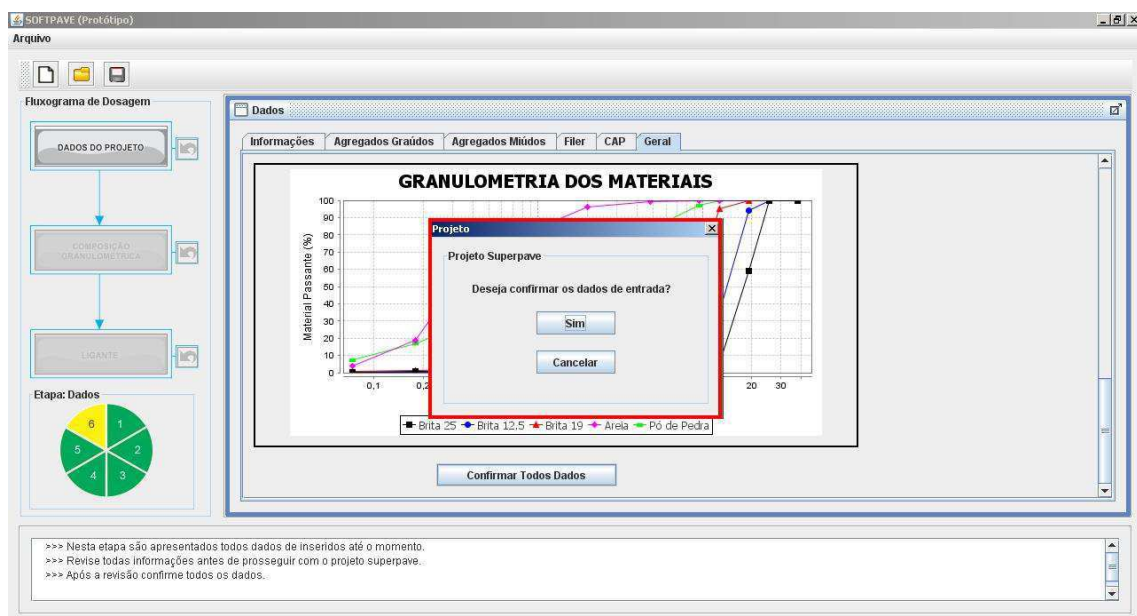
Filer	CAP
<p>FILER: Cal</p> <p>Granulometria (Porcentagem passante):</p> <p>N°200 = 97 %</p> <p>Peso Específico Real: 2.240 kN/m<sup>3</sup>            Peso Específico Aparente: 2.238 kN/m<sup>3</sup></p>	<p>Cap Original =====</p> <p>Ponto de Amolecimento: 60 °C            Ponto de Fulgor = 250 °C            Massa Específica = 1.027 g/cm<sup>3</sup>            Penetração = 60 dmm</p> <p>RTFO =====</p> <p>Perda de Massa = 0.7 %</p> <p>DSR =====</p> <p>Virgem (G*/senδ) = 1.2 KPa            Após RTFO (G*/senδ) = 2.5 KPa            Após PAV (G*/senδ) = 1500 KPa</p> <p>BBR =====</p>

**Tela 25 – Resumo dos dados do filer e do CAP**



Tela 26 – Granulometria dos materiais utilizados no projeto da mistura: curva convencional

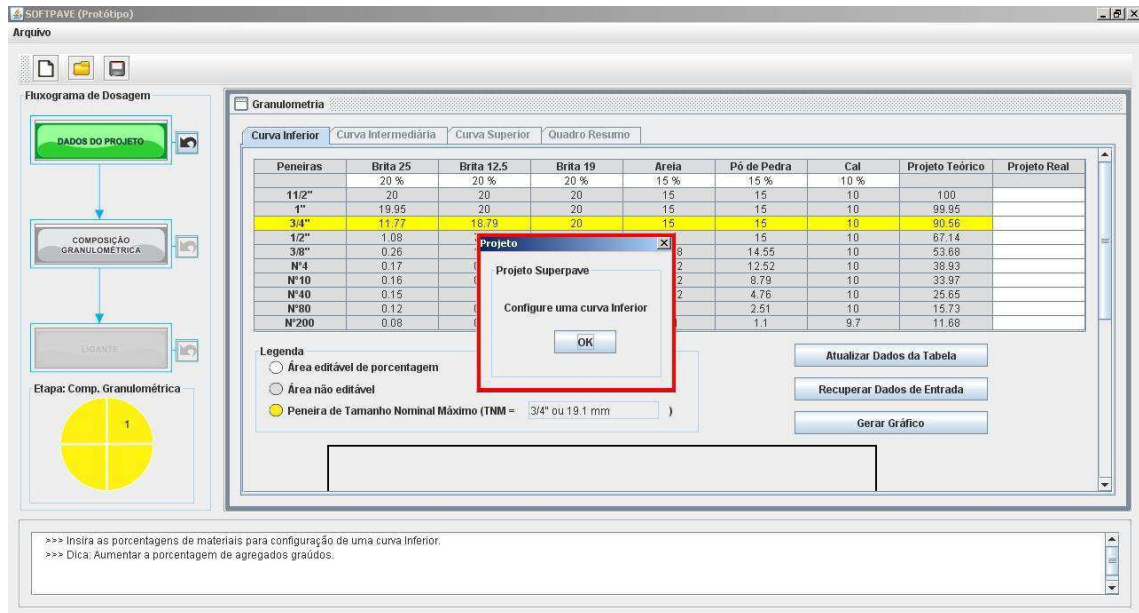
Ao clicar no botão “Confirmar” da Tela 26 será aberta a Tela 27 que apresenta uma janela de confirmação de todos os dados inseridos. O botão “Sim” passa para próxima etapa de dosagem e o botão “Cancelar” faz com que o usuário continue na área de Dados.



Tela 27 – Confirmação das composições granulométricas

Ao clicar no botão “Sim” da Tela 27 será aberta a segunda fase do projeto SUPERPAVE que corresponde a Composição Granulométrica. A Tela 28 apresenta uma janela de confirmação na qual o software

pede para o usuário configurar uma curva inferior. Ao clicar no botão “OK” o usuário libera a tabela de composição granulométrica da curva inferior.



**Tela 28 – Confirmação de configuração para uma curva inferior**

A Tela 29 apresenta a tabela granulométrica da curva inferior tendo em vista que o usuário deverá inserir as porcentagens corretas para configurar esta curva. O software oferece uma dica na área de retorno para configurar uma curva inferior. Nesta mesma figura é possível perceber que o software oferece porcentagens por “default”. A linha amarela corresponde a peneira de Tamanho Nominal Máximo que é recalculada a partir do momento que o usuário atualiza os dados da tabela.

Peneiras	Brita 25	Brita 12.5	Brita 19	Areia	Pó de Pedra	Cal	Projeto Teórico	Projeto Real
11/2"	20 %	20 %	20 %	15 %	15 %	10 %	100	
1"	19.95	20	20	15	15	10	99.95	
3/4"	11.77	19.79	20	15	15	10	90.56	
1/2"	1.08	7.05	19.01	15	15	10	67.14	
3/8"	0.26	1.47	12.42	14.98	14.55	10	53.68	
Nº4	0.17	0.15	1.17	14.92	12.52	10	38.93	
Nº10	0.16	0.12	0.48	14.42	8.79	10	33.97	
Nº40	0.15	0.1	0.32	10.32	4.76	10	25.65	
Nº80	0.12	0.08	0.22	2.8	2.51	10	15.73	
Nº200	0.08	0.05	0.14	0.61	1.1	9.7	11.68	

Legenda

Área editável de porcentagem

Área não editável

Peneira de Tamanho Nominal Máximo (TNM = 3/4" ou 19.1 mm )

Atualizar Dados da Tabela

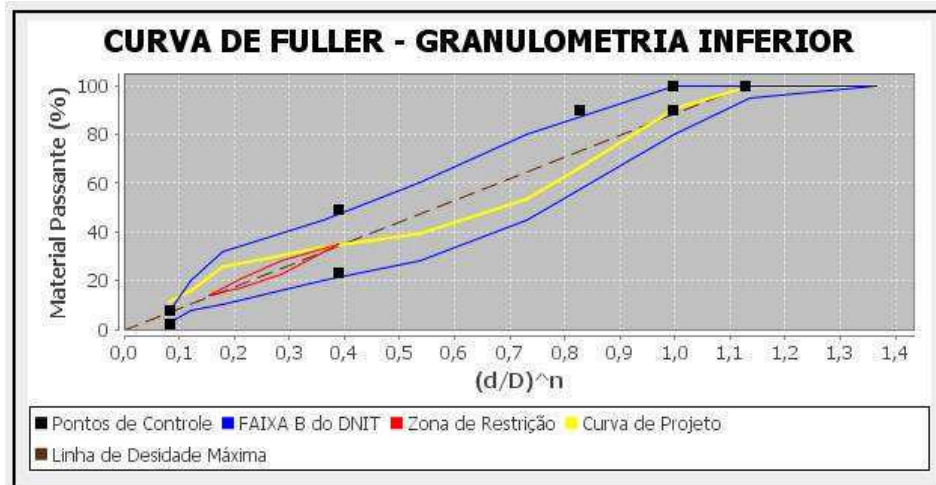
Recuperar Dados de Entrada

Gerar Gráfico

**Tela 29 – Tabela granulométrica**

Ao gerar o gráfico clicando no botão “Gerar Gráfico” o usuário perceberá que a curva não condiz com uma granulometria inferior (Tela 30). É necessário que o usuário insira as porcentagens coerentes e clique no

botão “Atualizar Dados da Tabela”. Se o usuário não tiver experiência suficiente para inserir de imediato as porcentagens coerentes, é necessário que este faça pequenos testes repetindo o processo de inserção das porcentagens, atualização da tabela e análise do gráfico, até chegar a uma curva coerente com a curva inferior.



Tela 30 – Curva de Fuller

A Tela 31 apresenta as porcentagens corretas para configurar uma curva inferior e os valores da tabela atualizados.

Peneiras	Brita 25	Brita 19	Brita 12.5	Areia	Pó de Pedra	Cal	Projeto Teórico	Projeto Real
	20 %	20 %	29 %	4 %	25 %	2 %		
11/2"	20	20	29	4	25	2	100	
1"	19.95	20	29	4	25	2	99.95	
3/4"	11.77	18.79	29	4	25	2	90.56	
1/2"	1.08	7.05	27.56	4	25	2	66.69	
3/8"	0.26	1.47	18.01	3.99	24.25	2	49.98	
Nº4	0.17	0.15	1.7	3.98	20.87	2	28.87	
Nº10	0.16	0.12	0.7	3.85	14.65	2	21.48	
Nº40	0.15	0.1	0.46	2.75	7.93	2	13.39	
Nº80	0.12	0.08	0.32	0.75	4.18	2	7.45	
Nº200	0.08	0.08	0.2	0.16	1.83	1.94	4.29	

Legenda

Área editável de porcentagem

Área não editável

Peneira de Tamanho Nominal Máximo (TNM = 3/4" ou 19.1 mm )

Atualizar Dados da Tabela

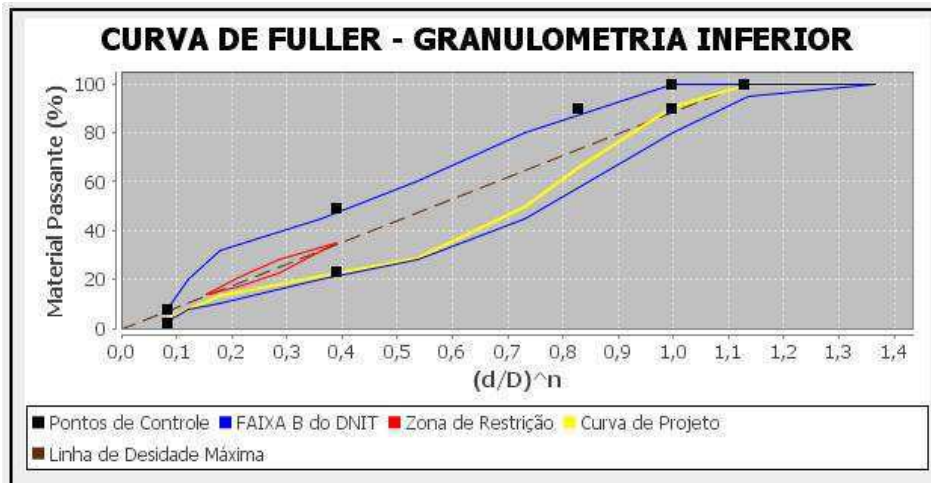
Recuperar Dados de Entrada

Gerar Gráfico

Tela 31 – Tabela granulométrica da curva inferior

A Tela 32 apresenta o gráfico da curva inferior gerado a partir das porcentagens presentes na Figura 00. O clique no botão “Gerar Próxima Curva” proporcionará que o usuário consiga configurar uma curva intermediária e posteriormente uma superior. Não está apresentado o passo-a-passo destes processos pois os procedimentos para as demais curvas (intermediária e superior) são os mesmos da curva inferior aqui citada.





Tela 32 – Curva de Fuller para configuração inferior

Ainda na Tela 32 é possível visualizar o botão “Gerar Relatório”, este relatório (.PDF) contém as porcentagens e o gráfico da curva em questão para possível composição granulométrica em laboratório tendo em vista que a última coluna da tabela de composição exige que o usuário insira as porcentagens passantes nas peneiras para o projeto real, ou seja, os resultados real da composição em laboratório. Até a composição da curva superior não é obrigatório estes valores reais, porém após este processo o software não permite a continuidade do projeto sem estes valores. Na Tela 33 é possível ver os valores do projeto real da curva inferior e na Tela 34 o gráfico contendo a curva de projeto (amarela) e a curva real (verde), as duas quase sobrepostas devido a aproximação dos valores.

Peneiras	Brita 25	Brita 19	Brita 12,5	Areia	Pó de Pedra	Cal	Projeto Teórico	Projeto Real
	20 %	20 %	29 %	4 %	25 %	2 %		
11/2"	20	20	29	4	25	2	100	100
1"	19.95	20	29	4	25	2	99.95	100
3/4"	11.77	18.79	29	4	25	2	90.56	91
1/2"	1.08	7.05	27.56	4	25	2	66.69	66
3/8"	0.26	1.47	18.01	3.99	24.25	2	49.98	50
Nº4	0.17	0.15	1.7	3.98	20.87	2	28.87	29
Nº10	0.16	0.12	0.7	3.85	14.65	2	21.48	21.4
Nº40	0.15	0.1	0.46	2.75	7.93	2	13.39	13.6
Nº80	0.12	0.08	0.32	0.75	4.18	2	7.45	7.4
Nº200	0.08	0.08	0.2	0.16	1.83	1.94	4.29	4.3

Legenda

Área editável de porcentagem

Área não editável

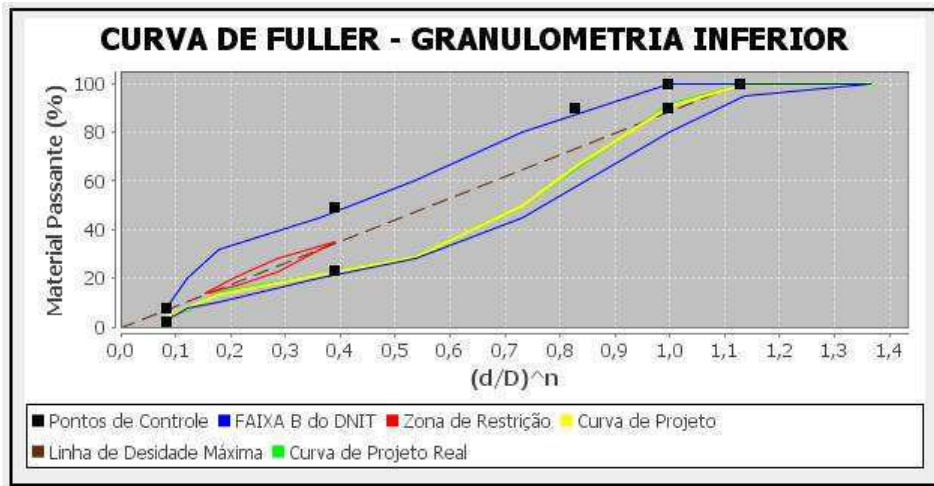
Peneira de Tamanho Nominal Máximo (TNM = 3/4" ou 19.1 mm )

Atualizar Dados da Tabela

Recuperar Dados de Entrada

Gerar Gráfico

Tela 33 – Tabela granulométrica completa da curva inferior



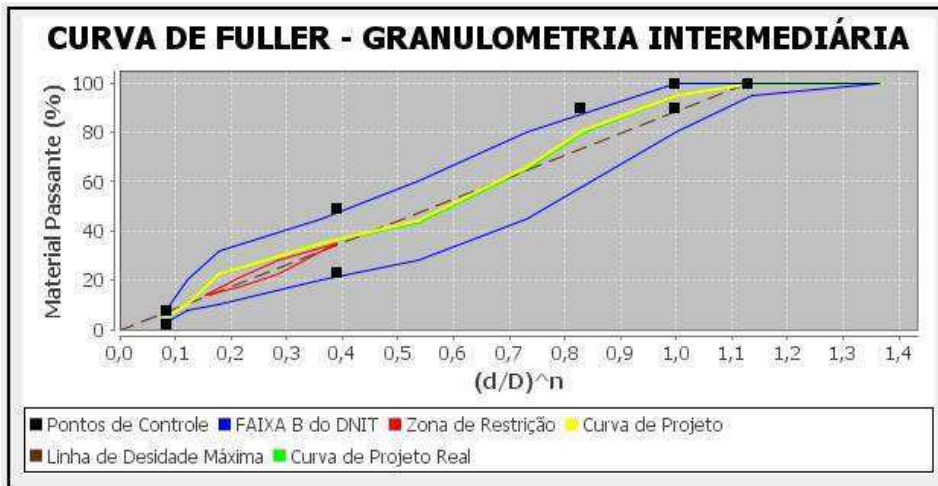
Tela 34 – Curva de Fuller para configuração inferior com a curva de Projeto Real

A Tela 35, a Tela 36, a Tela 37 e a Tela 38 apresentam as tabelas e os gráficos das curvas intermediária e superior, respectivamente.

Peneiras	Brita 25	Brita 12.5	Brita 19	Areia	Pó de Pedra	Cal	Projeto Teórico	Projeto Real
	10 %	13 %	30 %	15 %	30 %	2 %		
11/2"	10	13	30	15	30	2	100	100
1"	9.98	13	30	15	30	2	99.98	100
3/4"	5.88	12.21	30	15	30	2	95.09	95
1/2"	0.54	4.58	28.51	15	30	2	80.63	80
3/8"	0.13	0.96	18.63	14.98	29.1	2	65.8	65
Nº4	0.08	0.1	1.76	14.92	25.04	2	43.9	43.5
Nº10	0.08	0.08	0.72	14.42	17.58	2	34.88	35
Nº40	0.08	0.06	0.48	10.32	9.52	2	22.46	22.5
Nº80	0.06	0.05	0.33	2.8	5.02	2	10.26	10.2
Nº200	0.04	0.03	0.21	0.61	2.2	1.94	5.03	5

Legenda  
 Área editável de porcentagem  
 Área não editável  
 Peneira de Tamanho Nominal Máximo (TNM =  )

Tela 35 – Tabela granulométrica completa da curva intermediária

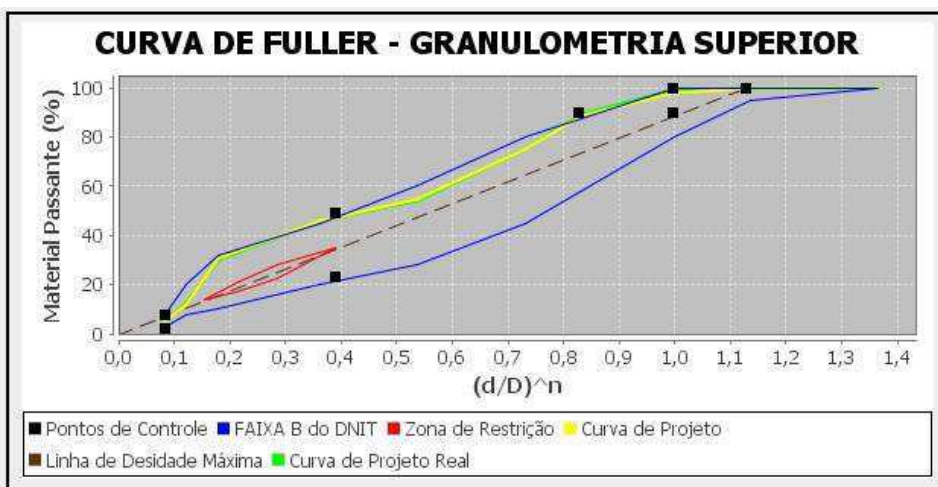


Tela 36 – Curva de Fuller para configuração intermediária com a curva de Projeto Real

Peneiras	Brita 25	Brita 12.5	Brita 19	Areia	Pó de Pedra	Cal	Projeto Teórico	Projeto Real
	3 %	11 %	28 %	27 %	29 %	2 %		
11/2"	3	11	28	27	29	2	100	100
1"	2.99	11	28	27	29	2	99.99	100
3/4"	1.77	10.33	28	27	29	2	98.1	99
1/2"	0.16	3.88	26.61	27	29	2	88.65	89
3/8"	0.04	0.81	17.39	26.96	28.13	2	75.33	75
Nº4	0.03	0.08	1.64	26.86	24.21	2	54.82	54
Nº10	0.02	0.07	0.67	25.96	16.99	2	45.71	46
Nº40	0.02	0.06	0.45	18.58	9.2	2	30.31	30
Nº80	0.02	0.04	0.31	5.04	4.85	2	12.26	12.4
Nº200	0.01	0.03	0.2	1.1	2.13	1.94	5.41	5.35

Área editável de porcentagem  
 Área não editável  
 Peneira de Tamanho Nominal Máximo (TNM =  )

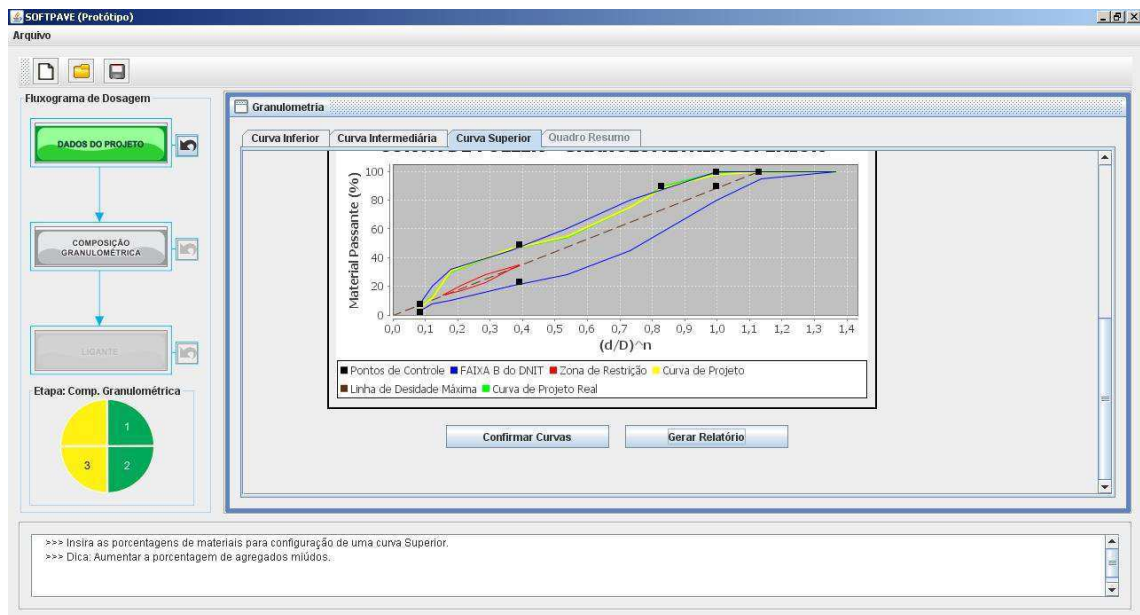
Tela 37 – Tabela granulométrica completa da curva superior



Tela 38 – Curva de Fuller para configuração superior com a curva de Projeto Real

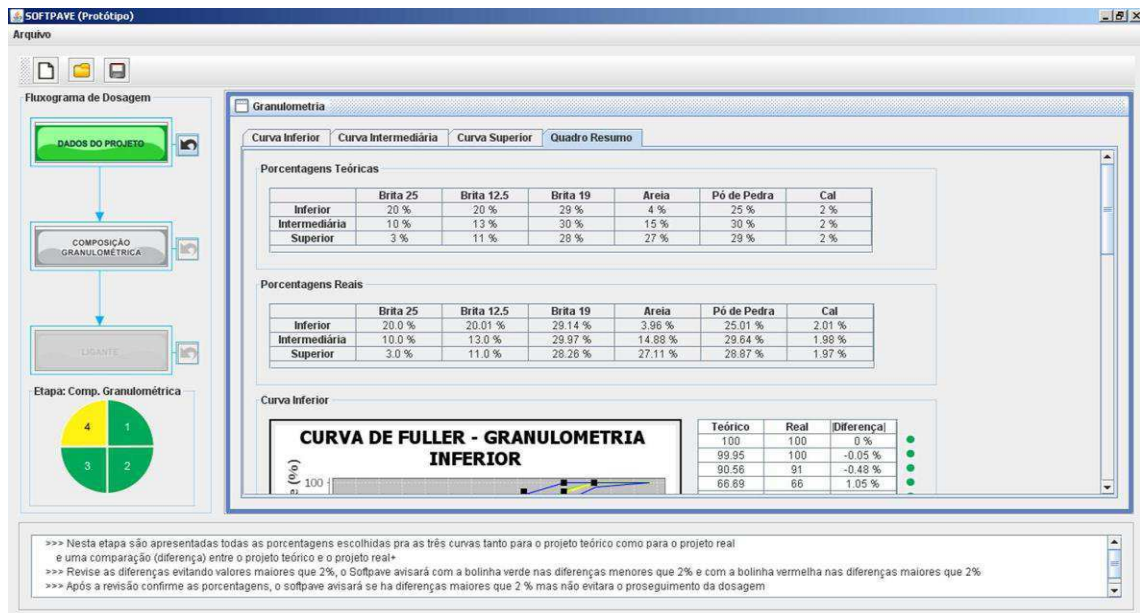


A Tela 39 apresenta a tela final da etapa de análise granulométrica.



Tela 39 – Tela final da etapa de análise granulométrica.

Ao clicar no botão “Confirmar Curvas” da Tela 39 será aberta a Tela 40 correspondente ao Quadro Resumo da etapa de composição granulométrica. Esta tela será detalhada a seguir.



Tela 40 – Quadro Resumo da etapa de composição granulométrica

A Tela 41 apresenta a tabela de porcentagens teóricas, que foram inseridas pelo usuário durante a etapa de composição granulométrica com o objetivo de ajustar uma curva inferior, intermediária e superior. Nesta mesma tela também é apresentada a tabela de porcentagens reais, que por sua são calculadas pelo software utilizando os dados da curva de projeto real.

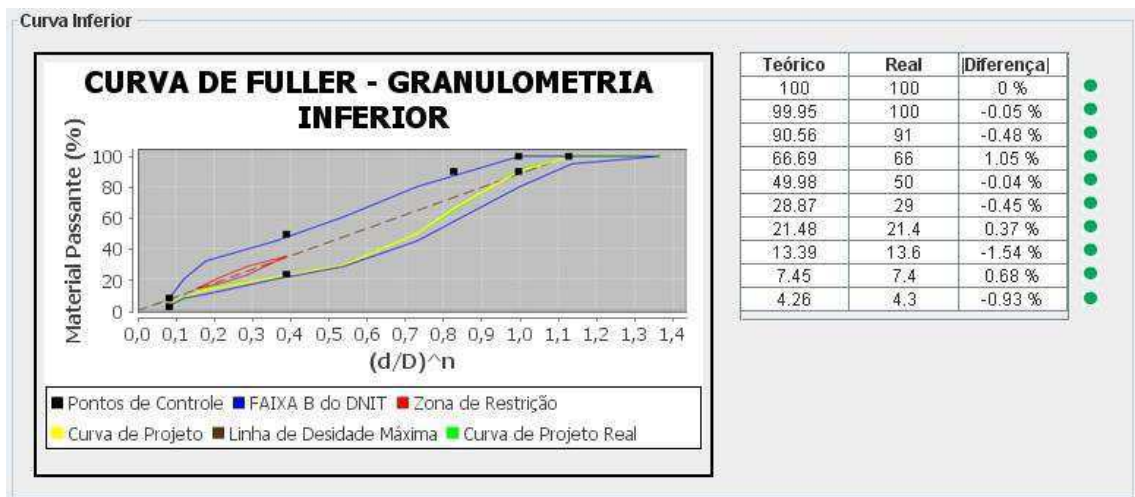
Porcentagens Teóricas						
	Brita 25	Brita 12.5	Brita 19	Areia	Pó de Pedra	Cal
Inferior	20 %	20 %	29 %	4 %	25 %	2 %
Intermediária	10 %	13 %	30 %	15 %	30 %	2 %
Superior	3 %	11 %	28 %	27 %	29 %	2 %

Porcentagens Reais						
	Brita 25	Brita 12.5	Brita 19	Areia	Pó de Pedra	Cal
Inferior	20.0 %	20.01 %	29.14 %	3.96 %	25.01 %	2.01 %
Intermediária	10.0 %	13.0 %	29.97 %	14.88 %	29.64 %	1.98 %
Superior	3.0 %	11.0 %	28.26 %	27.11 %	28.87 %	1.97 %

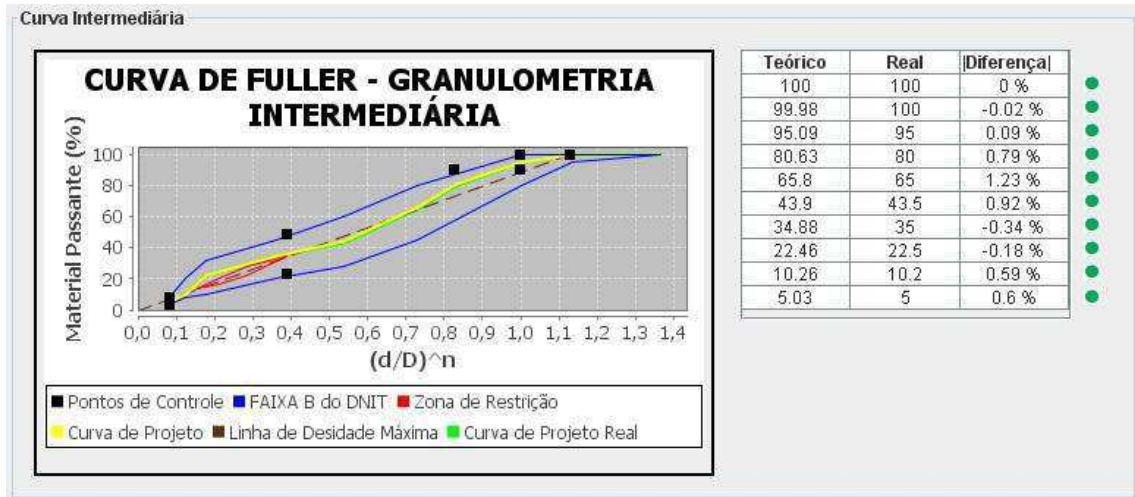
Tela 41 – Tabelas de porcentagens Teóricas e Reais

A Tela 42 apresenta o gráfico da curva inferior e a tabela comparativa do projeto real e teórico. Nessa tabela é calculada a diferença entre os dois projetos granulométricos. O pequeno círculo verde ao lado da tabela é resultante de uma diferença menor que 2%, acima desse valor o círculo torna-se vermelho.

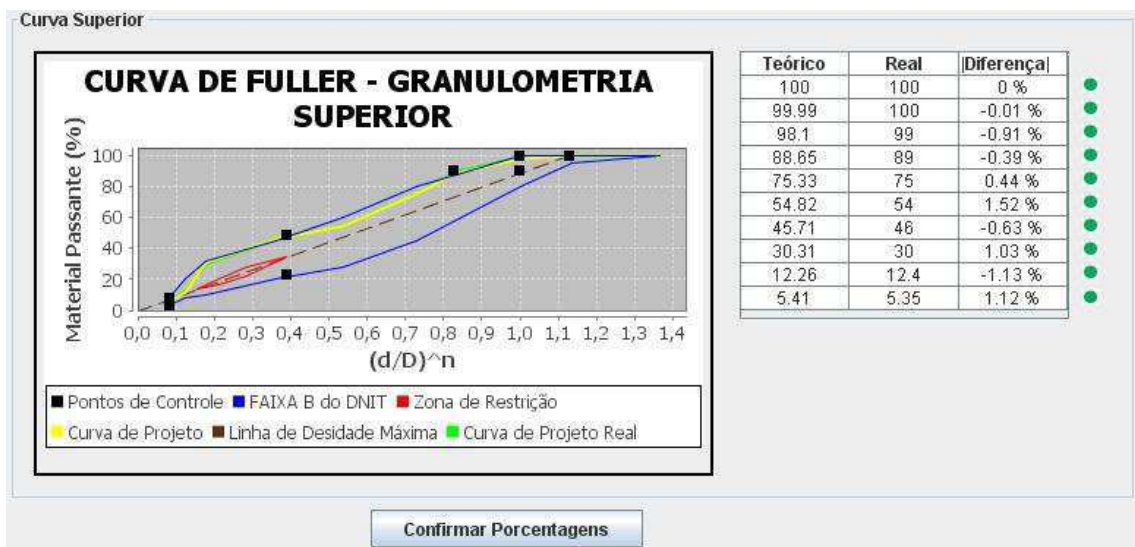


Tela 42 – Gráfico da curva inferior e tabela comparativa do projeto real e teórico

A Tela 43, a Tela 44 e a Tela 45 apresentam os gráficos e as tabelas comparativas do projeto real e teórico das curvas intermediária e superior respectivamente.

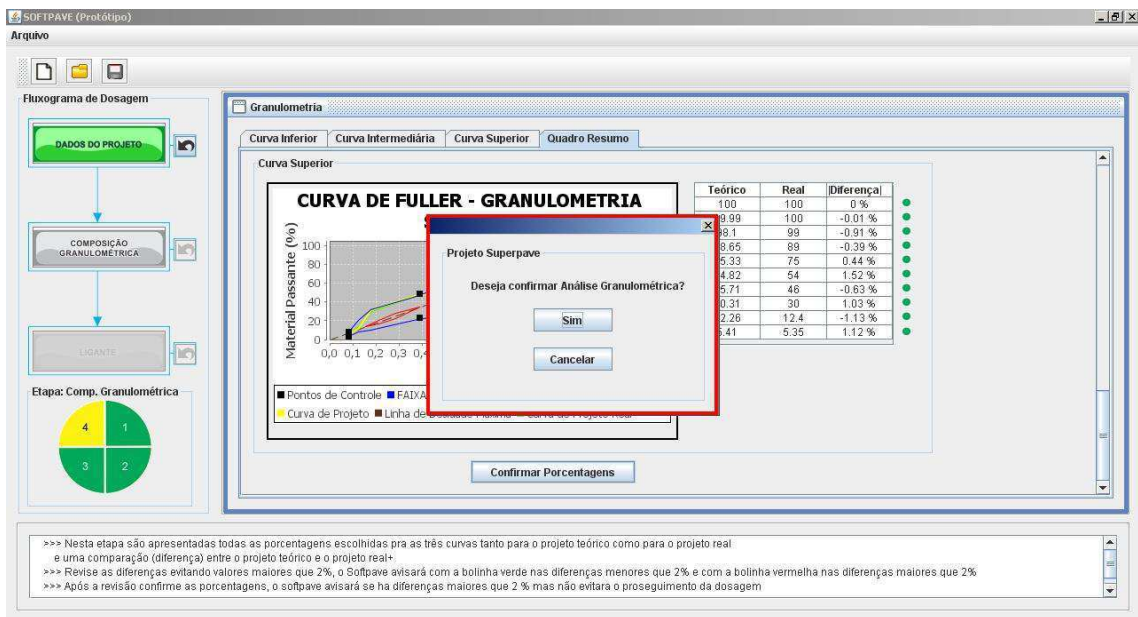


Tela 43 – Gráfico da curva intermediária e tabela comparativa do projeto real e teórico



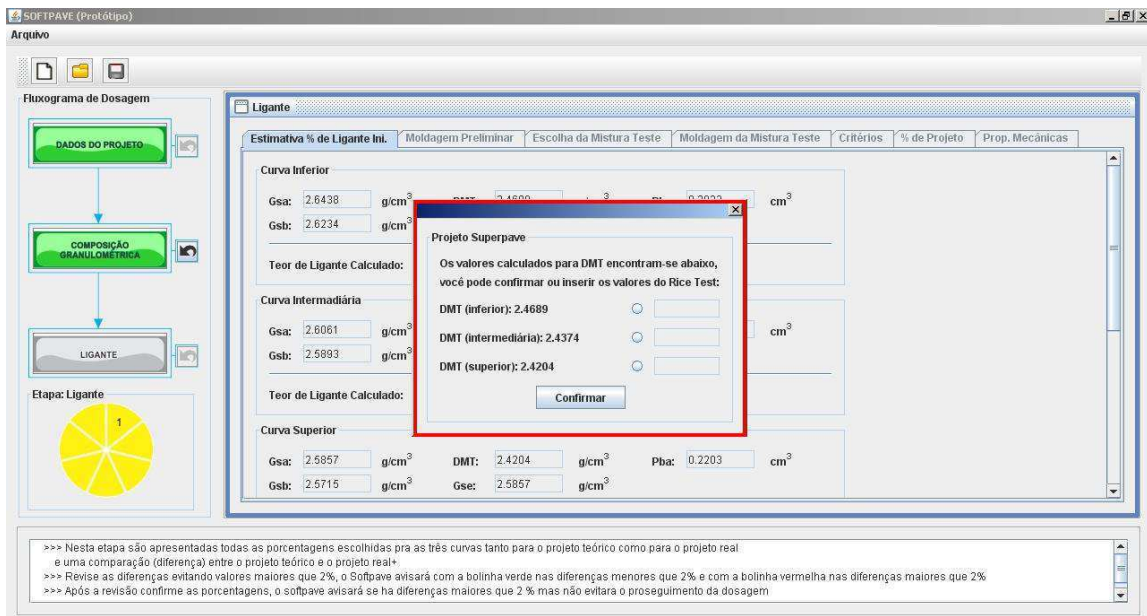
Tela 44 – Gráfico da curva superior e tabela comparativa do projeto real e teórico

Ao clicar no botão “Confirmar Porcentagens” da Tela 44 será aberta a Tela 55 que por sua vez apresenta a confirmação da etapa de composição granulométrica. O botão “Sim” proporciona a passagem para última fase do projeto SUPERPAVE e o botão “Cancelar” faz com que o usuário permaneça na etapa de granulometria.



Tela 45 – Confirmação da etapa de composição granulométrica

Ao clicar no botão “Sim” da Tela 45 o software vai para uma etapa prévia a de Ligante com o objetivo de estimar um teor de ligante inicial, proporcionando ao usuário modificar a DMT calculada por a DMT obtida no Rice Test (Tela 46).



Tela 46 – Modificação da DMT calculada por DMT do Rice Test

A Tela 47 apresenta os valores das DMTs para este exemplo.

**Projeto Superpave**

Os valores calculados para DMT encontram-se abaixo, você pode confirmar ou inserir os valores do Risk Test:

DMT (inferior): 2.4689     

DMT (intermediária): 2.4374     

DMT (superior): 2.4204     

Tela 47 – Mudança da DMT

A Tela 48 apresenta os valores calculados e a estimativa do teor de ligante inicial.

Curva Inferior					
Gsa:	<input type="text" value="2.6438"/>	g/cm <sup>3</sup>	DMT:	<input type="text" value="2.538"/>	g/cm <sup>3</sup>
Gsb:	<input type="text" value="2.7"/>	g/cm <sup>3</sup>	Gse:	<input type="text" value="2.7271"/>	g/cm <sup>3</sup>
Teor de Ligante Calculado:			<input type="text" value="4.1396"/>	%	
Pba: <input type="text" value="0.3774"/> cm <sup>3</sup>					
Curva Intermediária					
Gsa:	<input type="text" value="2.6061"/>	g/cm <sup>3</sup>	DMT:	<input type="text" value="2.551"/>	g/cm <sup>3</sup>
Gsb:	<input type="text" value="2.72"/>	g/cm <sup>3</sup>	Gse:	<input type="text" value="2.7428"/>	g/cm <sup>3</sup>
Teor de Ligante Calculado:			<input type="text" value="4.2005"/>	%	
Pba: <input type="text" value="0.3137"/> cm <sup>3</sup>					
Curva Superior					
Gsa:	<input type="text" value="2.5857"/>	g/cm <sup>3</sup>	DMT:	<input type="text" value="2.554"/>	g/cm <sup>3</sup>
Gsb:	<input type="text" value="2.74"/>	g/cm <sup>3</sup>	Gse:	<input type="text" value="2.7464"/>	g/cm <sup>3</sup>
Teor de Ligante Calculado:			<input type="text" value="4.4164"/>	%	
Pba: <input type="text" value="0.0876"/> cm <sup>3</sup>					
Legenda					
Gsa = massa específica real da composição de agregados;					
Gsb = massa específica aparente da composição de agregados;					
DMT = densidade máxima teórica da composição de agregados;					
Gse = massa específica efetiva da composição de agregados;					
Pba = volume de ligante efetivo.					

Tela 48 – Estimativa do teor de ligante inicial



A Tela 49 apresenta que o usuário deve escolher o tráfego para escolha do N(inicial), N(projeto) e N(máximo). Neste exemplo escolhemos o tráfego “Médio a alto”.

Tipos de Tráfego

Médio a alto (vias principais / rodovias rurais)

Confirmar

Tela 49 – Escolha do tipo de tráfego

Ao clicar no botão “Confirmar” da Tela 49 o software abrirá uma janela de confirmação dos números de giros do compactador CGS como apresenta a Tela 50. Neste exemplo usaremos os números de giros gerados pelo programa.

SOFTPAVE (Protótipo)

Arquivo

Fluxograma de Dosagem

DADOS DO PROJETO

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

LIGANTE

Etapa: Ligante

1

Estimativa % de Ligante Inicial

Moldagem Preliminar

Escolha da Mistura Teste

Moldagem da Mistura Teste

Crêrios

% de Projeto

Prop. Mecânicas

Gsb: 2.74 g/cm<sup>3</sup> Gse: 2.7464 g/cm<sup>3</sup>

Teor de Ligante Calculado

Legenda

Gsa = massa específica r

Gsb = massa específica a

DMT = densidade máxima

Gse = massa específica e

Pba = volume de ligante e

Tipos de Tráfego

Muito leve (local)

Projeto Superpave

Seus números de giros no CGS encontram-se abaixo.

Você pode confirmar ou inserir outros valores de giro:

N(projeto) = 50

N(máximo) = 75

Confirmar?

Sim Não

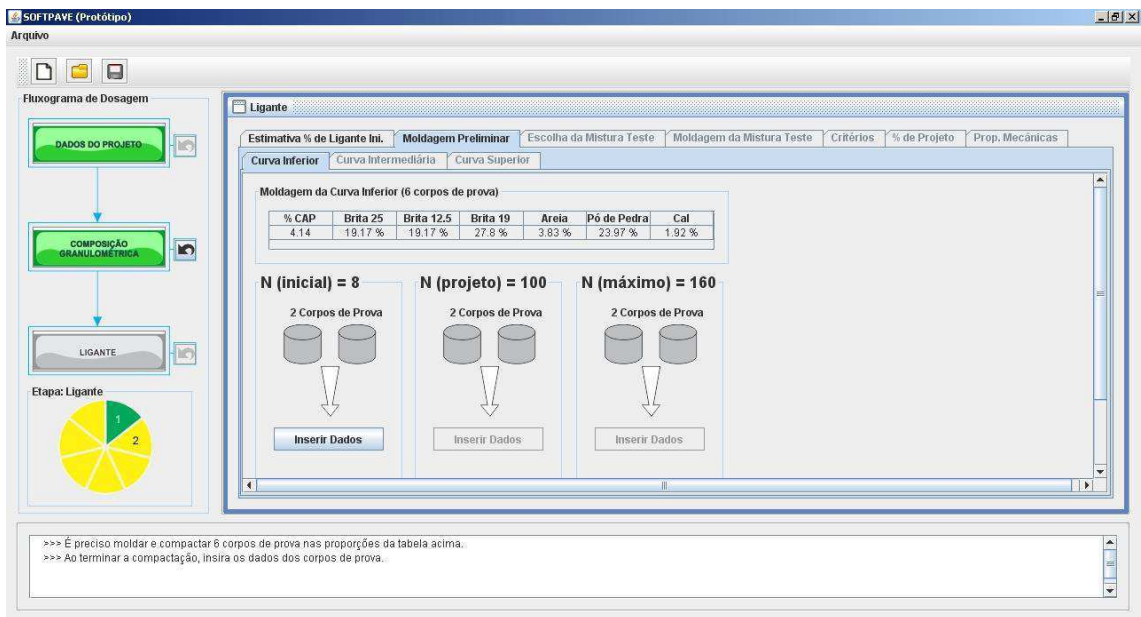
Confirmar

>>> O teor de ligante inicial foi estimado para as três curvas.

>>> Escolha o tráfego.

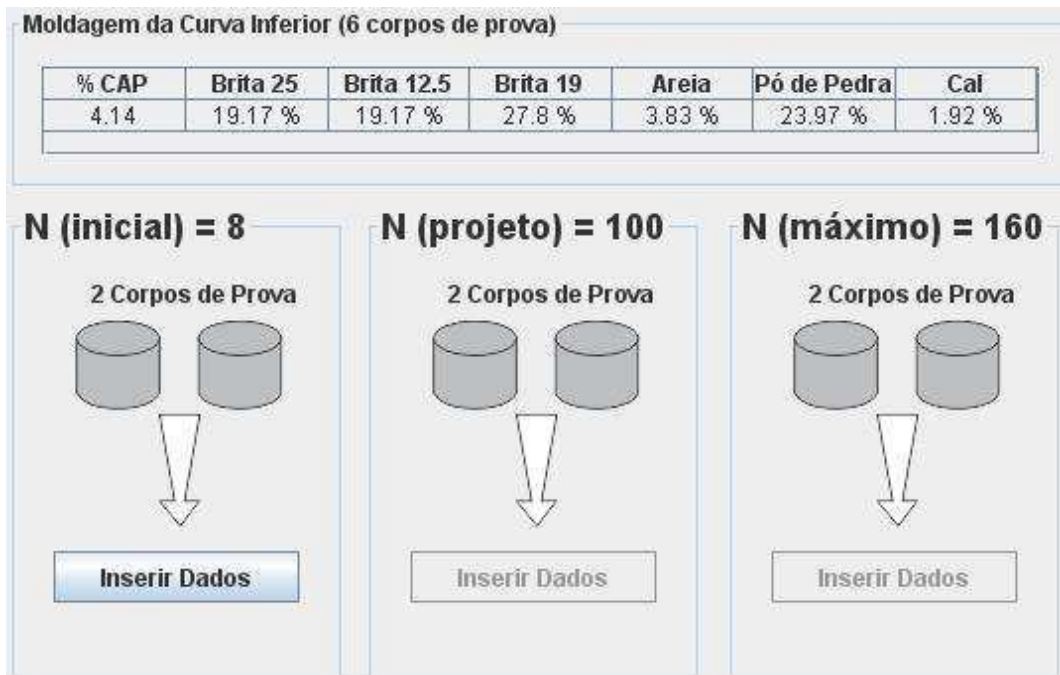
Tela 50 – Confirmação dos números de giros do compactador CGS

Ao confirmar o número de giros entraremos na fase de Moldagem Preliminar [compactação de oitos corpos de prova iniciais] que por sua vez é apresentada na Tela 51.



Tela 51 – Moldagem preliminar

A Tela 52 apresenta o detalhamento das informações de moldagem. De acordo com a figura o software exige a moldagem de 6 corpos de prova com as proporções dos materiais definidas na tabela. Sendo que 2 corpos de prova vão ser compactados com um número de giros de 8 no CGS, mais 2 corpos de prova com 100 e os outros 2 com 160.



Tela 52 – Detalhamento da moldagem preliminar

Ao clicar no botão “Inserir Dados” da Tela 52 o software abre a janela de informações da compactação dos dois corpos de prova referidos. Nesta área devem ser inseridos os dados dos dois corpos de provas após a compactação. Posteriormente o usuário deve clicar no botão “Confirmar Dados”. Após o clique, o software mostrará na área inferior desta janela os resultados de todos os parâmetros calculados dos dois corpos de prova inseridos, permitindo que o usuário possa fazer a análise destes parâmetros. Após o cálculo o usuário pode clicar no botão “Confirmar Dados dos Corpos de Prova” (Tela 53).

The screenshot shows a software window titled "N (inicial) = 8" with a close button in the top right corner. The window is divided into two main sections: "Área de Inserção de Dados" (Data Entry Area) and "Parâmetros Calculados" (Calculated Parameters).

**Área de Inserção de Dados:** This section contains two columns for "Corpo de Prova 1" and "Corpo de Prova 2". Each column has four input fields: "Massa Seca" (g), "Massa Submersa" (g), "Média das Alturas" (mm), and "Média dos Diâmetros" (mm). A "Confirmar Dados" button is centered below these fields.

**Parâmetros Calculados:** This section also has two columns for "Corpo de Prova 1" and "Corpo de Prova 2". Each column has five input fields: "Volume" (cm<sup>3</sup>), "Volume Teórico" (cm<sup>3</sup>), "Gmb" (g/cm<sup>3</sup>), "Gmb corrigida" (g/cm<sup>3</sup>), and "Volume de Vazios" (%). A "Confirmar Dados dos Corpos de Prova" button is centered below these fields.

Tela 53 – Informações da compactação dos corpos de prova referidos



A seguir, na Tela 54, segue a mesma tela com os valores calculados.

N (inicial) = 8

Área de Inserção de Dados

Corpo de Prova 1		Corpo de Prova 2	
Massa Seca	1201.8 g	Massa Seca	1198.1 g
Massa Submersa	703.9 g	Massa Submersa	701 g
Média das Alturas	74.3 mm	Média das Alturas	74.1 mm
Média dos Diâmetros	100.4 mm	Média dos Diâmetros	93.8 mm

Confirmar Dados

---

Parâmetros Calculados

Corpo de Prova 1		Corpo de Prova 2	
Volume	497,900 cm <sup>3</sup>	Volume	497,100 cm <sup>3</sup>
Volume Teórico	588,229 cm <sup>3</sup>	Volume Teórico	512,052 cm <sup>3</sup>
Gmb	2,043 g/cm <sup>3</sup>	Gmb	2,340 g/cm <sup>3</sup>
Gmb corrigida	2,414 g/cm <sup>3</sup>	Gmb corrigida	2,410 g/cm <sup>3</sup>
Volume de Vazios	4,896 %	Volume de Vazios	5,036 %

Confirmar Dados dos Corpos de Prova

Tela 54 – Calculo dos parâmetros dos corpos de prova referidos

Ao clicar no botão “Confirmar Dados dos Corpos de Prova” da Tela 54 o software fechará a janela atual e voltará para janela anterior com a confirmação em verde de que os valores dos dois primeiros corpos de prova foram inseridos com sucesso, assim como apresenta a Tela 55.

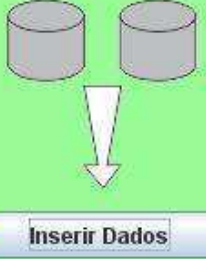
**Moldagem da Curva Inferior (6 corpos de prova)**

% CAP	Brita 25	Brita 12.5	Brita 19	Areia	Pó de Pedra	Cal
4.14	19.17 %	19.17 %	27.8 %	3.83 %	23.97 %	1.92 %

**N (inicial) = 8**

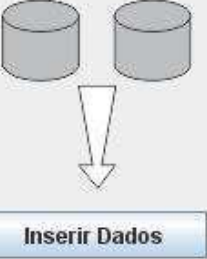
2 Corpos de Prova



Inserir Dados

**N (projeto) = 100**

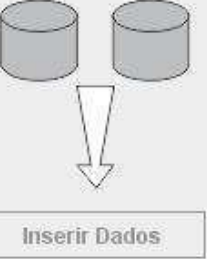
2 Corpos de Prova



Inserir Dados

**N (máximo) = 160**

2 Corpos de Prova



Inserir Dados

**Tela 55 – Sucesso ao inserir informações de compactação**

Esse processo deve ser repetido para os outros corpos de prova das curvas intermediária e superior. A Tela 56 e a Tela 57 mostram as telas de confirmação das moldagens para estas duas curvas, respectivamente.

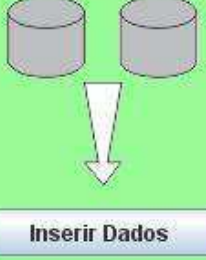
**Moldagem da Curva Intermediária (6 corpos de prova)**

% CAP	Brita 25	Brita 12.5	Brita 19	Areia	Pó de Pedra	Cal
4.2	19.16 %	19.16 %	27.78 %	3.83 %	23.95 %	1.92 %

**N (inicial) = 8**

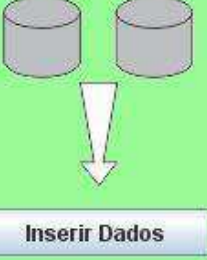
2 Corpos de Prova



Inserir Dados

**N (projeto) = 100**

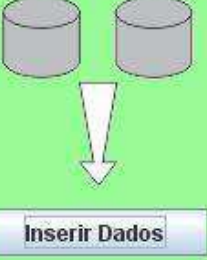
2 Corpos de Prova



Inserir Dados

**N (máximo) = 160**

2 Corpos de Prova



Inserir Dados

**Tela 56 – Moldagem preliminar da curva intermediária**

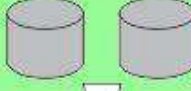
**Moldagem da Curva Superior (6 corpos de prova)**

% CAP	Brita 25	Brita 12.5	Brita 19	Areia	Pó de Pedra	Cal
4.42	19.12 %	19.12 %	27.72 %	3.82 %	23.9 %	1.91 %

**N (inicial) = 8**

2 Corpos de Prova

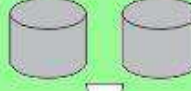


↓

Inserir Dados

**N (projeto) = 100**

2 Corpos de Prova

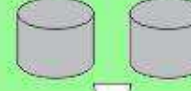


↓

Inserir Dados

**N (máximo) = 160**

2 Corpos de Prova

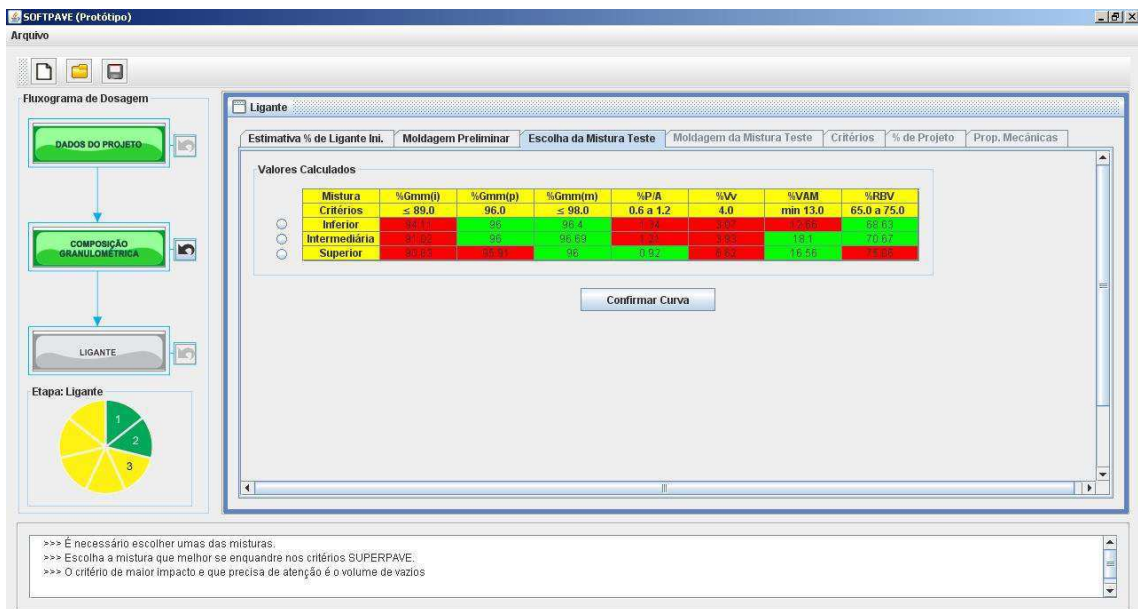


↓

Inserir Dados

Tela 57 – Moldagem preliminar da curva superior

Após a confirmação dos 18 corpos de prova o software direciona o usuário para a Tela 58. Lá são calculados todos parâmetros e resumidos em uma tabela de valores para que o usuário possa escolher qual das três curvas trabalhadas se enquadra melhor nos critérios SUPERPAVE.



**Fluxograma de Dosagem**

DADOS DO PROJETO

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

LIGANTE

Etapa: Ligante

**Ligante**

Estimativa % de Ligante In. | Moldagem Preliminar | Escolha da Mistura Teste | Moldagem da Mistura Teste | Critérios | % de Projeto | Prop. Mecânicas

Valores Calculados

Mistura	%Gmm(i)	%Gmm(p)	%Gmm(m)	%PA	%W	%VAM	%RBV
Crítérios	≤ 89.0	96.0	≤ 98.0	0.6 a 1.2	4.0	mm 13.0	65.0 a 75.0
Inferior	19.12	95	96.4	1.34	4.07	12.56	68.63
Intermediária	4.42	95	96.69	1.31	4.83	19.1	70.67
Superior	27.72	95.91	96	0.92	3.62	16.56	69.68

Confirmar Curva

>>> É necessário escolher umas das misturas.  
>>> Escolha a mistura que melhor se enquadre nos critérios SUPERPAVE.  
>>> O critério de maior impacto e que precisa de atenção é o volume de vazios

Tela 58 – Escolha da mistura teste

A Tela 59 apresenta com maior detalhe a tabela citada acima. Esta tabela contém os nomes dos critérios na primeira linha, os valores dos critérios na segunda linha e nas outras três linhas os valores

calculados para suas respectivas curvas. É possível perceber que os valores que ficaram dentro dos critérios tem sua célula da cor verde, enquanto os valores que ficaram fora dos critérios tem sua célula vermelha.

Pode-se perceber que a curva que melhor se enquadrou nos critérios exigidos foi a curva Intermediária, que por sua vez já foi marcada pelo usuário nos campos de combinações a esquerda da tabela. Esta escolha é feita pelo usuário e deve levar em consideração o critério de volume de vazios (igual a 4%) que por sua vez é de grande importância para a dosagem.

**Valores Calculados**

Mistura	%Gmm(i)	%Gmm(p)	%Gmm(m)	%P/A	%Vv	%VAM	%RBV
<b>Crítérios</b>	≤ 89.0	96.0	≤ 98.0	0.6 a 1.2	4.0	min 13.0	65.0 a 75.0
<input type="radio"/> Inferior	84.11	96	96.4	1.34	3.07	12.68	68.63
<input checked="" type="radio"/> Intermediária	91.02	96	96.69	1.21	3.93	18.1	70.67
<input type="radio"/> Superior	90.83	95.91	96	0.92	6.62	16.56	75.06

Confirmar Curva

Tela 59 – Detalhamento da tabela de escolha da mistura teste

Ao clicar no botão “Confirmar Curva” da Tela 59 o software abre uma tela de confirmação da curva escolhida, conforme apresenta a Tela 60.

The screenshot shows the 'Ligante' window with the 'Escolha da Mistura Teste' tab selected. The 'Valores Calculados' table is visible, and a confirmation dialog box is overlaid on top. The dialog box contains the following text:

Projeto Superpave  
 Curva escolhida = Intermediária  
 Deseja confirmar?  
 Sim  
 Cancelar

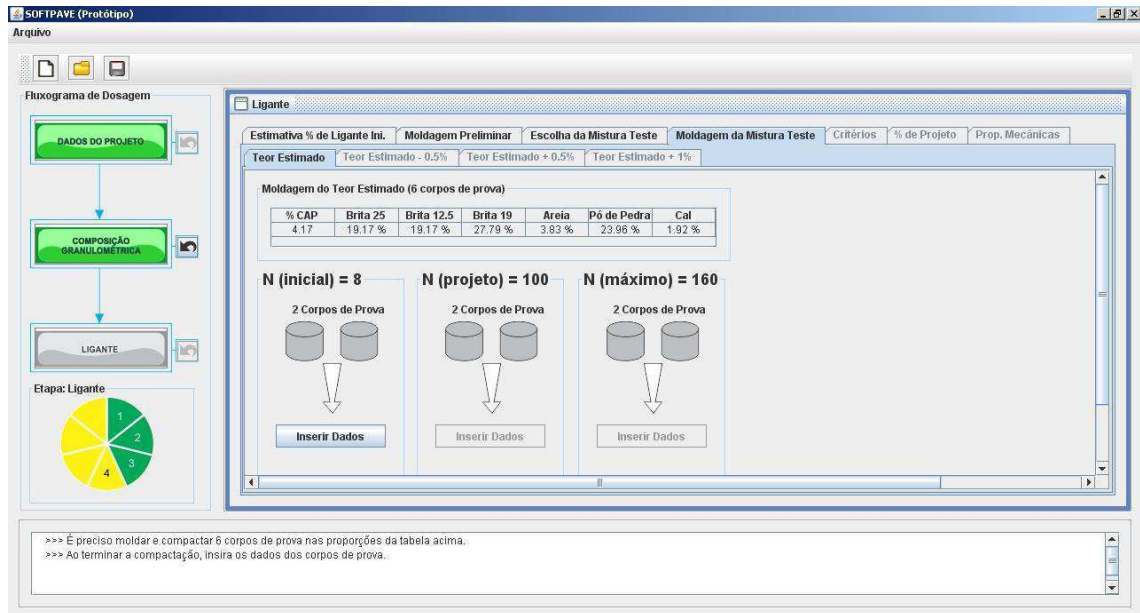
At the bottom of the software window, there are instructions in Portuguese:

- >>> É necessário escolher umas das misturas.
- >>> Escolha a mistura que melhor se enquadre nos critérios SUPERPAVE.
- >>> O critério de maior impacto e que precisa de atenção é o volume de vazios

Tela 60 – Confirmação da curvada mistura teste escolhida

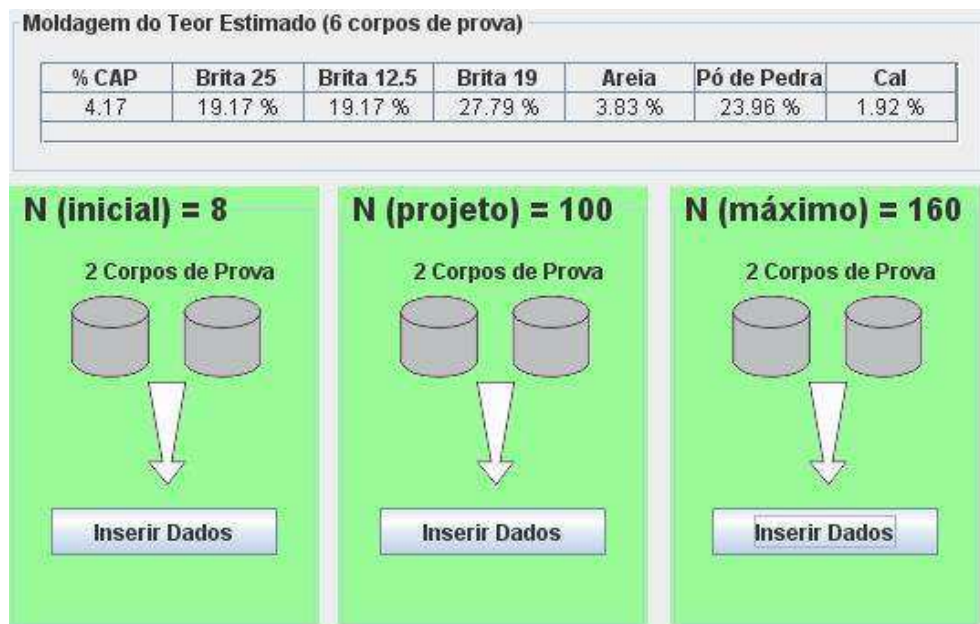
Ao clicar no botão “Sim” da Tela 60 o software entrará na fase de Moldagem da Mistura Teste que por sua vez é mostrada na Tela 61. Esta fase exige a moldagem de 24 corpos de prova. Sendo 6 para um teor

estimado de acordo com o teor da curva escolhida anteriormente (neste exemplo é a intermediária), 6 para o teor estimado - 0,5%, 6 para o teor estimado + 0,5% e 6 para o teor estimado + 1%.



Tela 61 – Moldagem da mistura teste

A manipulação desta fase do software é igual a realizada na primeira moldagem que foi descrita. Portanto, na Tela 62, na Tela 63, na Tela 64 e na Tela 65 seguem a confirmação dos dados dos corpos de prova para os teor estimado, teor estimado - 0,5%, teor estimado + 0,5% e teor estimado + 1%, respectivamente.



Tela 62 – Moldagem da mistura teste (teor estimado)



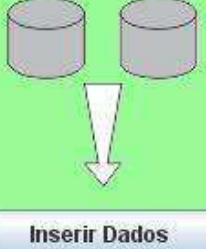
**Moldagem do Teor Estimado - 0.5% (6 corpos de prova)**

% CAP	Brita 25	Brita 12.5	Brita 19	Areia	Pó de Pedra	Cal
3.67	19.27 %	19.27 %	27.94 %	3.85 %	24.08 %	1.93 %

**N (inicial) = 8**

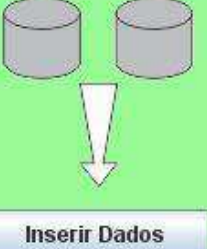
2 Corpos de Prova



Inserir Dados

**N (projeto) = 100**

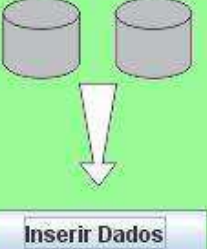
2 Corpos de Prova



Inserir Dados

**N (máximo) = 160**

2 Corpos de Prova



Inserir Dados

Tela 63 – Moldagem da mistura teste (teor estimado - 0,5%)

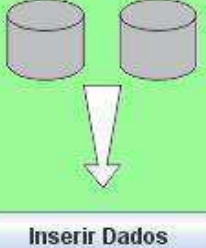
**Moldagem do Teor Estimado + 0.5% (6 corpos de prova)**

% CAP	Brita 25	Brita 12.5	Brita 19	Areia	Pó de Pedra	Cal
4.67	19.07 %	19.07 %	27.65 %	3.81 %	23.83 %	1.91 %

**N (inicial) = 8**

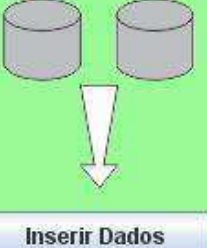
2 Corpos de Prova



Inserir Dados

**N (projeto) = 100**

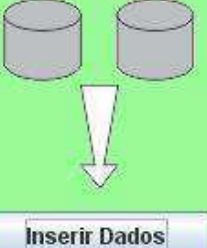
2 Corpos de Prova



Inserir Dados

**N (máximo) = 160**

2 Corpos de Prova



Inserir Dados

Tela 64 – Moldagem da mistura teste (teor estimado + 0,5%)

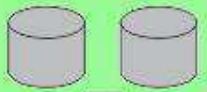
**Moldagem do Teor Estimado +1% (6 corpos de prova)**

% CAP	Brita 25	Brita 12.5	Brita 19	Areia	Pó de Pedra	Cal
5.17	18.97 %	18.97 %	27.5 %	3.79 %	23.71 %	1.9 %

**N (inicial) = 8**

2 Corpos de Prova

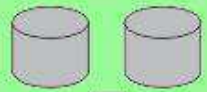


↓

Inserir Dados

**N (projeto) = 100**

2 Corpos de Prova

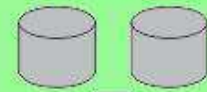


↓

Inserir Dados

**N (máximo) = 160**

2 Corpos de Prova

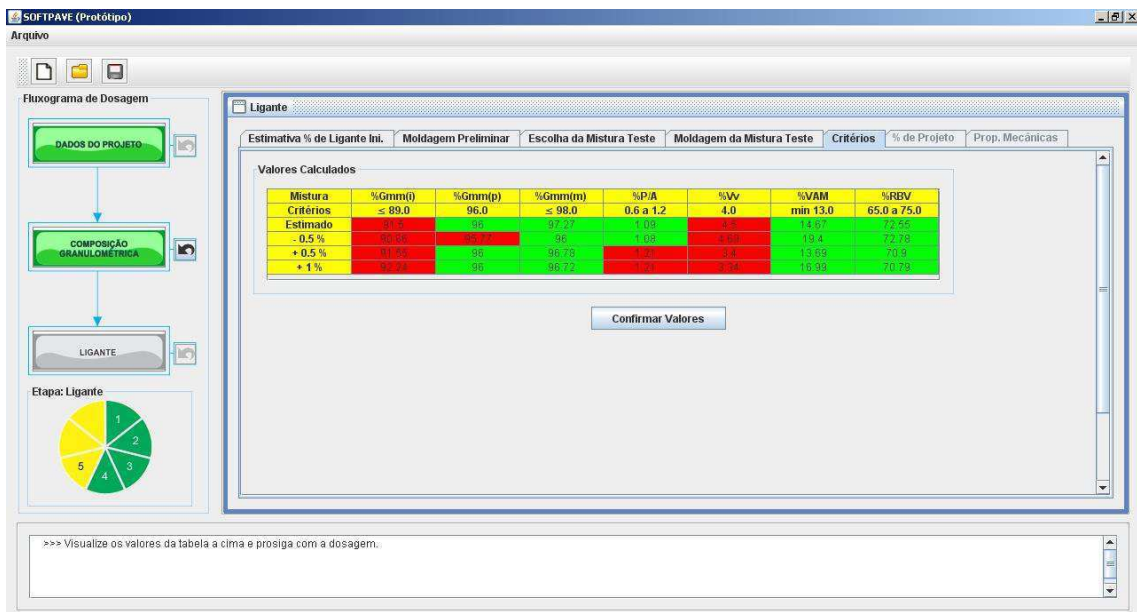


↓

Inserir Dados

Tela 65 – Moldagem da mistura teste (teor estimado + 1%)

Após a confirmação dos 24 corpos de prova o software direciona o usuário para tela da Tela 66. São calculados todos parâmetros e detalhados e apresentados em uma tabela de valores para que o usuário possa visualizar melhor o enquadramento aos critérios SUPERPAVE. Diferentemente do passo anterior onde o usuário fazia a escolha da curva de acordo com os critérios, nesta tela o usuário apenas confirma os valores no botão “Confirmar Valores”.



**Fluxograma de Dosagem**

- DADOS DO PROJETO
- COMPOSIÇÃO GRANULOMETRICA
- LIGANTE
- Etapa: Ligante

**Ligante**

Estimativa % de Ligante Iní. | Moldagem Preliminar | Escolha da Mistura Teste | **Moldagem da Mistura Teste** | Critérios | % de Projeto | Prop. Mecânicas

**Valores Calculados**

Mistura	%Gmm(l) ≤ 89.0	%Gmm(p) 96.0	%Gmm(m) ≤ 98.0	%P/A 0.6 a 1.2	%Vv 4.0	%VAM min 13.0	%RBV 65.0 a 75.0
Crítérios	89.0	96.0	98.0	0.6	4.0	13.0	65.0
Estimado	91.96	95.72	96.70	1.09	4.69	13.4	72.76
- 0.5 %	91.96	95.72	96.70	1.12	4.4	13.89	70.9
+ 0.5 %	91.96	95.72	96.72	1.07	4.34	13.92	70.78
+ 1 %	91.96	95.72	96.72	1.07	4.34	13.92	70.78

Confirmar Valores

>>> Visualize os valores da tabela a cima e prosiga com a dosagem.

Tela 66 – Tabela de critérios resumidos

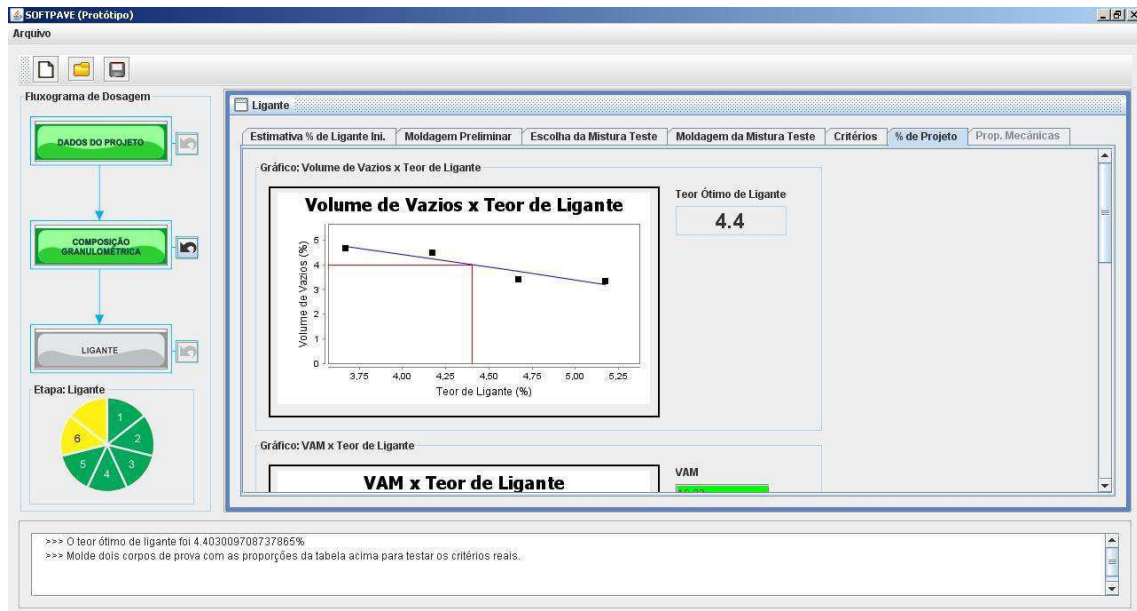
A Tela 67 apresenta com maior detalhe a tabela citada acima.

Mistura	%Gmm(i)	%Gmm(p)	%Gmm(m)	%P/A	%Wv	%VAM	%RBV
<b>Crítérios</b>	<b>≤ 89.0</b>	<b>96.0</b>	<b>≤ 98.0</b>	<b>0.6 a 1.2</b>	<b>4.0</b>	<b>min 13.0</b>	<b>65.0 a 75.0</b>
Estimado	91.5	96	97.27	1.09	4.5	14.67	72.55
- 0.5 %	90.66	95.77	96	1.08	4.69	19.4	72.78
+ 0.5 %	91.55	96	96.78	1.21	3.4	13.69	70.9
+ 1 %	92.24	96	96.72	1.21	3.34	16.99	70.79

**Confirmar Valores**

Tela 67 – Detalhamento da tabela de critérios resumidos

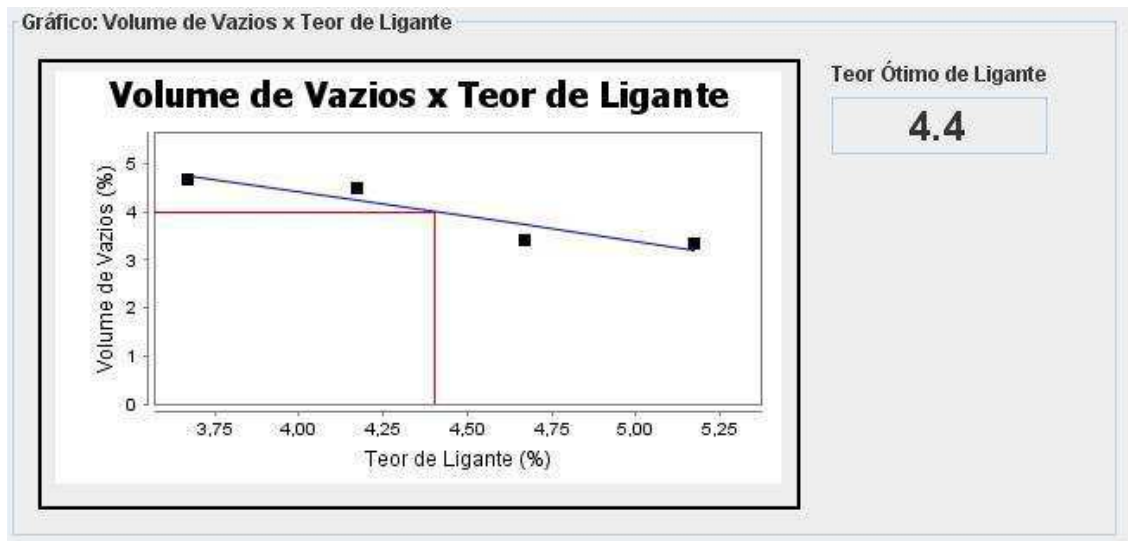
Após confirmar os valores o software direciona o usuário para tela de cálculo do teor de projeto final, conforme apresenta a Tela 68.



Tela 68 – Teor de ótimo de ligante

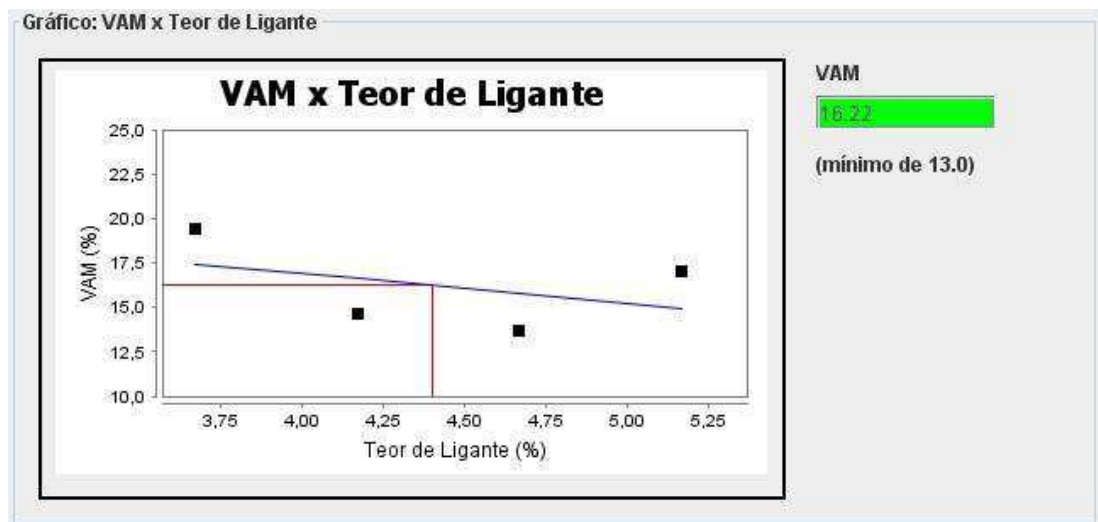
Detalhando a Tela 68 é possível perceber na Tela 69 que o software já apresenta o valor do teor ótimo de ligante (no exemplo foi de 4.4). Este valor é calculado pelo gráfico a esquerda que por sua vez apresenta os 4 teores de ligante da fase anterior, uma reta ajustada a estes pontos pelo método de ajuste de curva linear e a escolha do teor ótimo de ligante através da entrada no gráfico com o valor de 4 % de volume de vazios.





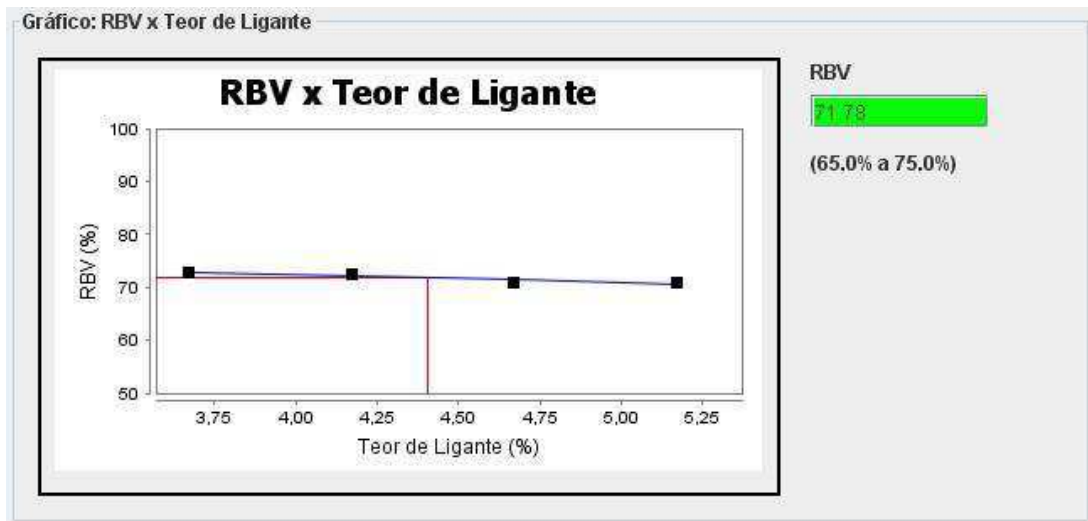
Tela 69 – Gráfico e valor do teor ótimo de ligante

A Tela 70 apresenta, ainda na mesma etapa, o valor de VAM calculado pela entrada no gráfico de VAM x Teor de Ligante com o valor do ligante escolhido da Tela 69. De acordo com o enquadramento no critério de VAM o campo de texto desse valor pode ficar verde ou vermelho.



Tela 70 – Gráfico e valor do VAM

A Tela 71 apresenta o valor da RBV calculada pela entrada no gráfico de RBV x Teor de Ligante com o valor do ligante escolhido na Tela 69. De acordo com o enquadramento no critério de RBV o campo de texto desse valor pode ficar verde ou vermelho.



Tela 71 – Gráfico e valor da RBV

O software ainda possibilita o usuário testar os critérios SUPERPAVE, agora, preparando dois corpos de prova com o teor ótimo de ligante calculado. Na tabela da Tela 72 são apresentadas as proporções de materiais para moldagem de 2 corpos de prova.

Preparação de 2 corpos de prova

% CAP	Brita 25	Brita 12.5	Brita 19	Areia	Pó de Pedra	Cal
4.4	19.12 %	19.12 %	27.72 %	3.82 %	23.9 %	1.91 %

Testar Parâmetros Reais

Volume de Vazios:  % (4%)

RBV:  % (65.0% a 75.0%)

VAM:  (mínimo de 13.0)

Pó/Asfalto:  % (0.6 % a 1.2 %)

Tela 72 – Teste para os critérios SUPERPAVE

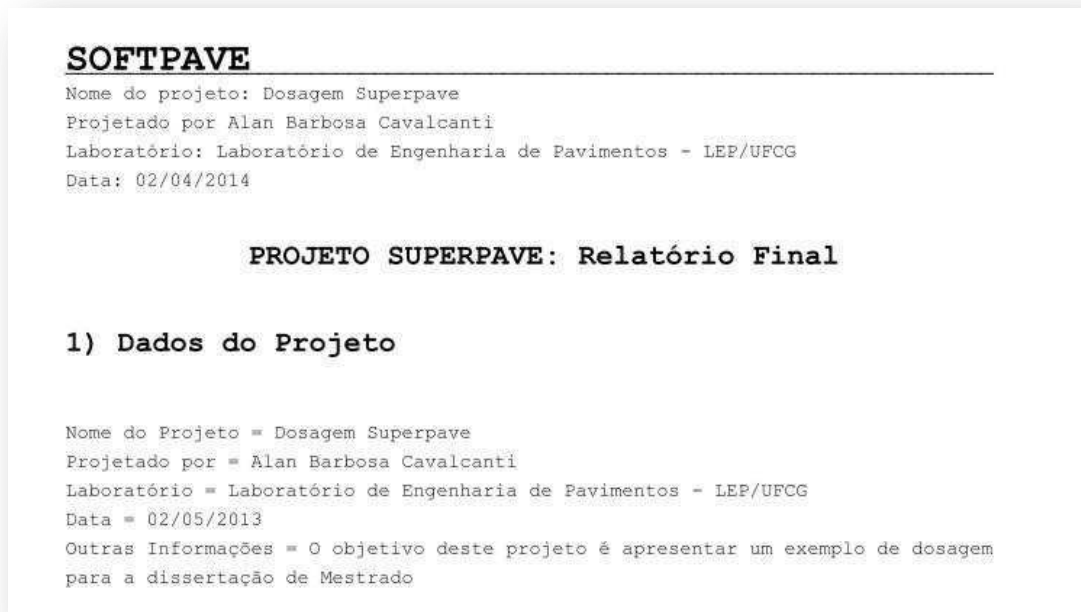
Ao clicar no botão “Confirmar Teor” da Tela 73 será aberta a Tela 74 correspondente a área de testes das propriedades mecânicas dos corpos de prova com o teor ótimo de projeto. Nesta tela é possível verificar se os corpos de prova se enquadram aos critérios pré-definidos de Resistência a Tração por Compressão Diametral Indireta (RT), Resistência ao Dano pela Umidade Induzida de Misturas Betuminosas (Lottman), Módulo de Resiliência (MR), Vida de Fadiga, Creep Estático e Creep Dinâmico.

Tela 73 – Visualização e cálculo das propriedades mecânicas dos corpos de prova da mistura final

A Tela 74 apresenta todos os ensaios de propriedades mecânicas que podem ser inseridos no software.

Tela 74 – Propriedades mecânicas que podem ser inseridas no software

A Tela 75 apresenta a primeira folha do relatório final gerado pelo programa.



**Tela 75 – Primeira página do relatório final**

# CAPÍTULO 5

---

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA AS FUTURAS PESQUISAS

### 5.1 Conclusões

Estes estudos indicam que é possível simplificar, com o uso da tecnologia, a dosagem SUPERPAVE, mesmo tendo em vista que o software desenvolvido nesta pesquisa exige uma grande quantidade de ensaios para a inserção dos dados.

Em se tratando de dosagem SUPERPAVE a sequência das atividades e a segurança em garantir valores dentro dos critérios pré-estabelecidos são de grande importância. Pode-se perceber que no SOFTPAVE foram inseridos comandos de interação com o usuário informando sua posição dentro do projeto além de, durante a dosagem de misturas asfálticas, não permitir o avanço mediante valores fora dos critérios preconizados pela normatização.

Referente à interface, tendo em vista as telas apresentadas no Capítulo 4, pode-se dizer que foi pensado em uma idéia simplista para não confundir a dosagem que por sua vez já é complexa por si só.

Pode-se inferir, a partir do exemplo apresentado que o software consegue determinar, com o auxílio do usuário, o teor de ligante ideal, a exemplo de 4,4%, dentro dos valores preconizados pelas as normas.

No que se refere aos dados de entrada para início do projeto de dosagem de misturas asfálticas do SOFTPAVE, é importante lembrar que o software consegue, durante todas as etapas, se adequar a quantidade de tipos de materiais que foram escolhidos inicialmente. Além disso, todos os parâmetros responsáveis por evitar o avanço da dosagem estão intimamente ligados e dependentes das escolhas de tráfego, espessura do revestimento, faixa de trabalho, tamanho nominal máximo, entre outros.

É importante destacar que o SOFTPAVE utiliza de parâmetros preconizados por normas brasileiras como ABNT e DNIT e por norte americanas como AASTHO e ASTM.

## 5.2 Sugestões para as futuras pesquisas

- Com a finalidade de melhorar e dar continuidade e aprofundamento do objeto desta pesquisa sugere-se os seguintes temas:

- Tendo em vista que um software nunca se torna um produto acabado e finalizado, é possível repensar e recriar vários componentes da interface do SOFTPAVE para possível melhoramento da manipulação da ferramenta por parte do usuário, além de ter o objetivo de tornar o programa cada vez mais intuitivo.

- Fazer testes de software é de extrema importância para evitar “bugs” futuros, por isso é necessário fazer uso de vários exemplos e analisar como a ferramenta permite o andamento da dosagem tendo em vista que cada material tem um comportamento diferente.

- É possível inserir módulos que possam ajudar na realização de todos os ensaios que oferecem suporte a dosagem SUPERPAVE, pensando nisso, é exequível que o detalhamento destes ensaios, seja dentro da ferramenta desenvolvida nesta pesquisa ou em pequenos programas formando ao todo uma suíte de aplicativos.

- Tendo em vista que a princípio o software foi desenvolvido para fins acadêmicos é possível ainda inserir funcionalidades que ajudam no fechamento do produto, como: manual de ajuda, importação e exportação de projetos, criação de uma extensão de arquivo própria do programa, encapsulamento do programa e de possíveis programas suportes em um instalador, entre outras funcionalidades.

- Para realizar o desenvolvimento de um software exige-se uma equipe de desenvolvimento multidisciplinar, composta por programadores e profissionais da área de aplicação da ferramenta, neste caso engenheiros civis, técnicos em construções e laboratoristas de pavimentação. Por isso, se torna necessária a revisão desta ferramenta por outros profissionais da área de computação e de engenharia, acrescentando assim, a este programa um ganho substancial em desempenho e funcionalidade.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO: AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. Road Test Report 5, Pavement research, Ed. The Highway Research Board, NAS-NRC Division of Engineering and Industrial Research Special Report 61E. Publicação n° 954, 1962.

AASHTO: AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T 283-89. (1989). Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage. In: American Association os State Highway Transportation Officials.

AASHTO: AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T 104-93: Soundness of Aggregate by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. USA, 1993.

AASHTO: AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T 112-93: Clay Lumps and Friable Particles in Aggregate. USA, 1993.

AASHTO: AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T 176-86: Plastic Fines In Graded Aggregates And Soils By Use Of The Sand Equivalent Test. USA, 1986.

AASHTO: AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO MP2: Standard Specifications for SUPERPAVE Volumetric Mix Design. USA, 2001.

AASHTO: AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO MP 8-01: Standard Specification for Designing Stone Matrix Asphalt (SMA). USA, 2005.

AASHTO: AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. Guide for Design of Pavements Structures. Washington, 2001.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 14950/03, Materiais Betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol. Rio de Janeiro: 2003.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 15184/04, Materiais betuminosos - Determinação da Viscosidade em Temperatura Elevada Usando um Viscosímetro Rotacional. Rio de Janeiro: 2004.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR NM 51/01, Agregado Graúdo – Ensaio de Abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro: 2001.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9935: Agregados: Terminologia. Rio de Janeiro, 2005.

AIREY, G. D.; BROWN, S. F. Rheological Performance of Aged Polymer Modified Bitumens Proceedings. Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 67, p.66-87, 1998.

ALBUQUERQUE, A.P.F.; PINTO, S.; VIEIRA, A.; VENTORINI, L.A.; LOPES, L.A.S., Influência da Energia de Compactação e da Temperatura de Moldagem nas Propriedades Mecânicas de orpos-de-prova de Mistura Asfáltica. 35ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Rio de Janeiro, RJ,2004.

ALDIGUERI D. R., SILVEIRA, M. A. e SOARES, J. B., Estudo comparativo entre compactação manual e automática de misturas asfálticas. Anais da 33a Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Florianópolis,2001.

ANP – AGENCIA NACIONAL DE PETROLEO, GAS NATURAL E BIOCMBUSTIVEIS. Resolução ANP nº 19, de 11 jul. 2005. Estabelece as especificações dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP). Brasília: Diario Oficial da Uniao, publicada em 12 jul. 2005, republicada em 13 jul. 2005, retificada em 25 jul. 2005 e 17 mar. 2006.

ASPHALT INSTITUTE (2001)Superpave Mix Design. Superpave Series N°2 (SP-2),Third Edition, USA.

ASTM – American Society for Testing and Materials (2002) D2419 Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate.

ASTM – American Society for Testing and Materials (2002) D4402 Standard Test Method for Viscosity Determinations of Unfilled Asphalts Using the Brookfield Thermosel Apparatus.

ASTM: American Society for Testing and Materials (1979). ASTM D 3497-79: Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures.

ASTM: American Society for Testing and Materials (1997). ASTM C 142: Clay Lumps & Friable Particles.

ASTM: American Society for Testing and Materials (1999). ASTM C 88: Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.

ASTM: American Society for Testing and Materials (2000). ASTM D 2041: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.

BALBO, J.T., Pavimentação Asfáltica: Materiais, Projetos e Restauração. São Paulo, Oficina de Texto,2007.

BECK, K. Programação extrema explicada: acolha as mudanças. Porto Alegre: Bookman, 2004.

BECK, Kent. Embrace Changing with eXtreme Programming. IEEE Computer. V. 32, n.10, 1999.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ. 2006.



BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L.M. G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B., Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros. Petrobras, ABEDA, Rio de Janeiro, 2007.

BOEHM, B. A Spiral Model of Software Development and Enhancement. IEEE Computer, v. 21 n. 5. 1988.

Bretas, R. E. S.; D'Avila, M. A. Reologia de Polímeros Fundidos. 2º ed., EdUFSCar, Sao Carlos, 2005.

BRIAN J. C. END KERA V., SUPERPAVE Compaction. Transportation Conference Proceedings, 1998.

BRITO, L. A. T. Avaliação e Análise Paramétrica do Ensaio de Compressão Diametral sob Cargas Repetidas em Misturas Asfálticas. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

Centro de Excelência em Asfalto, CEASF, 2009, <http://ceasf.petrobras.com.br/portal>. Acesso em 20/11/2012.

CERVO, T. C. (2004). Estudo da resistência à fadiga de concretos de cimento Portland para pavimentação. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 220 p., São Paulo.

CHOWDHURY, A.; GRAU, J.D.C.; BUTTOM, J.W.; LITTLE, D.N. (2001) Effect of Aggregate Gradation on Permanent Deformation of Superpave HMA. 80th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington, DC.

CLARO D. B. e SOBRAL J. B. M. PROGRAMAÇÃO EM JAVA. Copyleft Pearson Education. Florianópolis, 2008.

CROSS, S.A., Experimental Cold In-Place Recycling with Hydrated Lime." Transportation Research Record No. 1684, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., USA, 1999.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 035/98. Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 1998.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 081/98. Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, 031/2004 - ES. Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, DNER ME 004/94. Material Betuminoso – Determinação da Viscosidade Saybolt-Furol a Alta Temperatura Método da Película Delgada – Norma Rodoviária. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ES 031/06. Pavimentos flexíveis – Mistura Asfáltica – Especificações de serviços, 2006.

DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ES 313/97. Pavimentação – Concreto Betuminoso – Norma Rodoviária. Rio de Janeiro, 1997.

DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 080/04. Solos – Análise Granulométrica por Peneiramento, 2004.

DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 051/94. Solos – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 138/94. Misturas betuminosas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes. Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro, 1996.

DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes. Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos. Rio de Janeiro, 1998.

DOWSON, M., NEJMEH, B., and RIDDLE, W. (1991). Fundamental software process concepts. In Proceedings of First European Workshop Software Process Modeling.

FALCÃO, M.F.B. e J. B. SOARES, 2002, “Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no estudo de materiais de pavimentação”. XVI Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes, ANPET, Natal, v.I, p. 169-181.

FILHO, W. P. P. Engenharia de Software: fundamentos, métodos e Padrões. Editora LTC. São Paulo, 2000.

FONSECA, O. A. Development of a Time-Dependent model for the Dynamic Modulus of Asphalt Mixes. Ph.D. dissertation. University of Maryland - Maryland, USA, 1995.

FURLAN, A. P., SANTOS, C. R. G. ; GIGANTE, A. C. ; FABBRI, G. T. , Algumas Considerações Acerca de Ensaio para Avaliação do Dano por Umidade em Mistura Asfáltica Densa. In: 35ª Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro, 2004.

GRECO, J. A. S. Construção de estradas e vias urbanas, Minas Gerais, 2006. Disponível em: <<http://etq.ufmg.br/~jjsela/pagina/notas%20conceitos%20pavimentacao.pdf>>. Acesso em: 25/02/2013.

HAND, A.J.; EPPS, A.L. (2001) Impact of Gradation Relative to the Superpave Restricted Zone on HMA Performance. 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.

HAND, A.J.; STIADY, J.L.; WHITE, T.D.; NOURELDIN, A.S.; GALAL, K. (2001) Gradation Effects on HMA Performance. 80th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington, DC.

- HICKS, R. G., Moisture damage in asphalt concret. TRB – Transportation Research Board, 1991.
- HOT MIX ASPHALT (HMA). FHWA Multi-Regional Asphalt Training and Certification Group, 1999, EUA.
- HUANG, Y.H. Pavement analysis and design. Englewood-Cliffs: Prentice-Hall, 1993.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, IBP; Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos. Comissão de asfalto, Rio de Janeiro, 6ª edição revista, 1999.
- INSTITUTO DO ASFALTO, “Manual de Asfalto”. LEXINTON, KY E.U.A., 1989, rev. 2002, editora Petrobras, Brasil.
- KANDHAL, P.S.; COOLEY JR., L.A. (2002) Coarse versus Fine-Graded Superpave Mixtures: Comparative Evaluation of Resistance to Rutting. 81th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington, DC.
- KHANAL, P. P.; MAMLOUK M. S., Tensile Versus Compressive Moduli of Asphalt Concrete. Transportation Research Record, 1995.
- LEE, K.W.; BRAYTON, T.E.; VEYERA, G.; HUFFMAN, J.; HARRINGTON, J., Modified SUPERPAVE Mix Design for Cold in Place Recycling Asphalt Mixtures, 2nd International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control. Auburn Alabama, USA, 2001.
- LEITE et al. Princípios do Projeto e Análise SUPERPAVE de Misturas Asfálticas. Petróleo Brasileiro S.A – PETROBAS, Rio de Janeiro, 1996.
- LEITE, L.F.M. Estudo de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros. 1999. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- LESUEUR, D. The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. Advances in Colloid and Interface Science, vol.145, p. 42-82, 2009.
- LONCHAMP, J. (1993). A structured conceptual and terminological framework for the software process engineering. In Proceedings of Second International Conference on the Software Process.
- MACHADO, C. V. Reologia e Viscometria. Serec – Petrobras, Rio de Janeiro, 1998.
- MAGALHÃES, S.T. Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Pavimentos de Alto Desempenho. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MARQUES, G. L. O, 2004, Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; Efeito da compactação por impacto e giratória. Tese de doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MEDEIROS, D. F. de , Influência Da Granulometria Nas Características Mecânicas De Misturas Asfálticas Para Aeródromos. Dissertação de Mestrado, UFCG. Engenharia Civil, Campina Grande. 2009.

MEDINA, J. , Mecânica dos Pavimentos, COPPE-UFRJ, editora UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.

MEDINA, J. e MOTTA, L. M. G. (2005) Mecânica dos Pavimentos. 2ª edição. Rio de Janeiro, RJ.

MILES, D. C.; BRISTON, J. H. Tecnologia dos Polímeros. São Paulo: Polígono. 1975.

MOTHÉ, C.G. Polímeros Fotossensíveis – Síntese e Propriedades de Borracha Fotossensíveis. 1981. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MOTTA, L. M. G., 1991, Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critérios de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MOTTA, L. M. G., Contribuição para a Estimativa do Módulo Resiliente de Misturas Asfálticas. In: 14º Encontro de Asfalto, Instituto Brasileiro do Petróleo, Rio de Janeiro, 1998.

MOTTA, L.M.G.; TONIAL, I.; LEITE, L.M.F; CONSTANTINO, R.S. (1996) Princípios do Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas. Tradução comentada, Rio de Janeiro, RJ.

MOTTA, R. S., Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. SP, 2005.

NASCIMENTO, L. A. H. Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

NETO, S. A. D., Materiais Asfálticos Alternativos para uso em Pavimentação. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, 2001.

Norma Europeia EN 12591:2009 TÍTULO Bitumen and bituminous binders – Specifications for paving grade bitumens Betumes e CAPs betuminosos – Especificações para betumes de pavimentação Dipc: 2010-01-01 Dtpc: 2011-01-01

PERNIN, J. M.A.R.S.. Un Modèle Opérationnel de Conception de Simulations Pédagogiques. Grenoble: Université Joseph Fourier, 1996. Tese (Doutorado) – Laboratoire CLIPS – IMAG, Université Joseph Fourier, 1996.

PFLEEGER, S.L. Software Engineering: Theory and Practice. 2 ed. New Jersey: Prentice Hall, 657 p, 2001.

PINTO, C. S.; Curso Básico de Mecânica dos Solos.3 ed. São Paulo, 2006.

PINTO, S., Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicações na Avaliação Estrutural de Pavimentos. Tese de Doutorado, COPPE / UFRJ, Engenharia Civil, Rio de Janeiro 1991.

PRESSMAN, R.S. Software Engeneering – A practitioner’s approach. Mc-GRAW-HILL, 2001.

ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S; BROWN, R.E.; LEE, D. e KENNED, Y. T. W. (1996). Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction. NAPA, Maryland, USA. (CAPÍTULO 2).

ROCHA, F. As atividades produtoras de software no Brasil. Rio de Janeiro: IPEA, 1998.

RODRIGUES, R.M. Estudo do Trincamento dos pavimentos. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1991.

ROHDE, L. , Estudo de Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Camadas Estruturais de 105 Pavimentos. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

ROYCE, W. Managing the Development of Large Software Systems. Proceedings of IEEE WESCON, August 1970.

SCHMITT, R. L.; HANNA, A. S.; RUSSEL, J. S.; NORDHEIM, E. V., Pavement Density Measurement Comparative Analysis using Core and Nuclear Methods. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 66, p. 379-406, 1997.

SHELL, The Shell bitumen handbook. 5. ed. Cambridge, 2003.

SHRP (1999). Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing. Asphalt Institute.

SILVA, H. R. D.; OLIVEIRA, J. R. M.; FERREIRA, C.; 2009, “Avaliação do desempenho de misturas betuminosas temperaturas”. XV CILA, Congresso Ibero-latino Americano do Asfalto, Lisboa, Portugal, 22 a 27 de novembro.

SILVA, J. A.A.; Estudo das Propriedades Físicas, de Estado e Mecânicas de Misturas Asfálticas párea os revestimentos de pista de aeródromo/José de Arimatéia Almeida e Silva.- Campina Grande, 2011.

SILVA, J. F. V. JFloat: Uma biblioteca de ponto flutuante para a linguagem Java com suporte a arredondamento Direcionado. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal - RN, 2007.

SOMMERVILLE, I. Engenharia de software. 8. ed. Pearson, 2006.

SOMMERVILLE, Ian. Engenharia de Software, 6 ed., Editora Pearson Addison Wesley: São Paulo, Brasil, 2003.

SOUZA, Leonardo José Silva. Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado com Óleo de Mamona / Leonardo José Silva Souza. Campina Grande, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental)– Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2012.

TANDON, V. et al. Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements. In: Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements. Anais. Transportation Research Board. California, Estados Unidos, 2003.

VASCONCELOS, K. L. (2004) Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometria. Dissertação de M.Sc., PETRAN/UFC, Fortaleza, CE.

Washington Asphalt Pavement Association, WAPA, 2009, Asphalt Pavement Guide. [http://www.asphaltwa.com/wapa\\_web/](http://www.asphaltwa.com/wapa_web/). Acesso em 03/01/2013.

WATSON, L.T.; LOHANI, V. K.; KIBLER, D.F.; DYNOND,R.L.;N.RAMAKRISHNAN,N.;SHAFFER,C.F. Integrated Computing Environments for Watershed Management. Journal of Computing in Civil Engineering. v.16, n.4,p. 259-268,2002.

WHITE, T.D. Marshall Procedures For Design And Quality Control Of Asphalt Mixtures. Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists Technical Sessions, San Antonio, v. 54, 1985.

WHITEOAK, D. (1990) Shell Bitumen Handbook, Inglaterra.

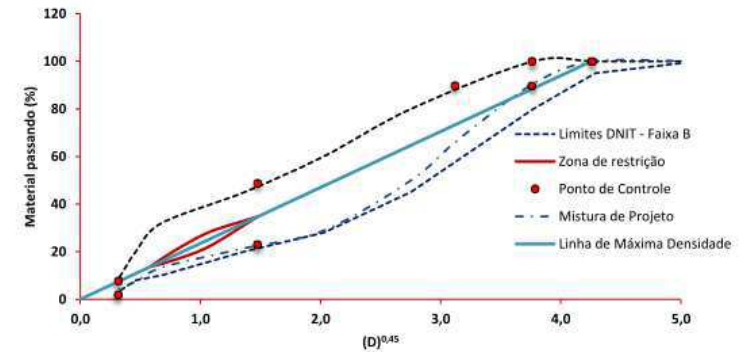
WITCZAK, M. W e R. E. Root, Summary of Complex Modulus Laboratory Test Procedures and Results. American Society for Testing and Materials, pp. 67-94, 1974.

# ANEXOS

---

## Anexo A – Curva de Fuller – Mistura Inferior

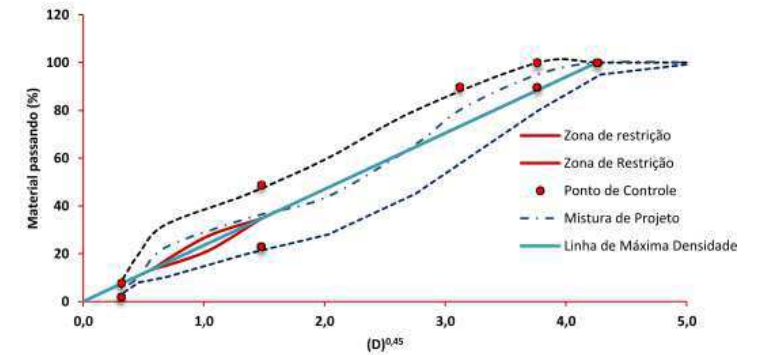
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL LEP - LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS MISTURA DE PROJETO INFERIOR																
PENEIRAS	PORCENTAGEM PASSANDO - MISTURA DE PROJETO INFERIOR 3I													ESPECIFICAÇÃO		(mm)
	BRITA 25		BRITA 19		BRITA 12.5		AREIA		PÓ DE PEDRA		FILLER		PROJETO	Faixa B		
	TOTAL	20%	TOTAL	20%	TOTAL	29%	TOTAL	4%	TOTAL	25,0%	TOTAL	2%				
1 1/2"	100,00	20,00	100,00	20,00	100,00	29,00	100,00	4,00	100,00	25,00	100,00	2,00	100,00	100	100	38,1
1"	99,73	19,95	100,00	20,00	100,00	29,00	100,00	4,00	100,00	25,00	100,00	2,00	99,95	95	100	25,4
3/4"	58,85	11,77	93,93	18,79	100,00	29,00	100,00	4,00	100,00	25,00	100,00	2,00	90,56	80	100	19,1
1/2"	5,41	1,08	35,27	7,05	95,07	27,57	100,00	4,00	100,00	25,00	100,00	2,00	66,71			12,7
3/8"	1,30	0,26	7,37	1,47	62,12	18,01	99,86	3,99	96,97	24,24	100,00	2,00	49,99	45	80	9,5
Nº 4	0,84	0,17	0,77	0,15	5,84	1,69	99,46	3,98	83,45	20,86	100,00	2,00	28,86	28	60	4,8
Nº 10	0,82	0,16	0,62	0,12	2,39	0,69	96,11	3,84	58,60	14,65	100,00	2,00	21,48	20	45	2
Nº 40	0,75	0,15	0,51	0,10	1,59	0,46	68,80	2,75	31,72	7,93	100,00	2,00	13,40	10	32	0,42
Nº 80	0,60	0,12	0,38	0,08	1,12	0,32	18,68	0,75	16,76	4,19	100,00	2,00	7,46	8	20	0,18
Nº 200	0,39	0,08	0,25	0,05	0,71	0,21	4,08	0,16	7,33	1,83	97,00	1,94	4,27	3	8	0,074





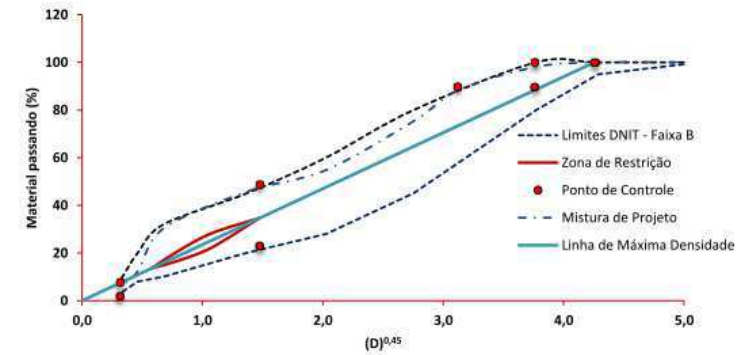
## Anexo B – Curva de Fuller – Mistura Intermediária

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL LEP - LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS MISTURA DE PROJETO INTERMEDIÁRIA																
PENEIRAS	PORCENTAGEM PASSANDO - MISTURA DE PROJETO INTERMEDIÁRIA 2M													ESPECIFICAÇÃO		(mm)
	BRITA 25		BRITA 19		BRITA 12.5		AREIA		PÓ DE PEDRA		FILLER		PROJETO	Faixa B		
	TOTAL	10%	TOTAL	13%	TOTAL	30%	TOTAL	15%	TOTAL	30,0%	TOTAL	2%				
1 1/2"	100,00	10,00	100,00	13,00	100,00	30,00	100,00	15,00	100,00	30,00	100,00	2,00	100,00	100	100	38,1
1"	99,73	9,97	100,00	13,00	100,00	30,00	100,00	15,00	100,00	30,00	100,00	2,00	99,97	95	100	25,4
3/4"	58,85	5,89	93,93	12,21	100,00	30,00	100,00	15,00	100,00	30,00	100,00	2,00	95,10	80	100	19,1
1/2"	5,41	0,54	35,27	4,59	95,07	28,52	100,00	15,00	100,00	30,00	100,00	2,00	80,65			12,7
3/8"	1,30	0,13	7,37	0,96	62,12	18,64	99,86	14,98	96,97	29,09	100,00	2,00	65,79	45	80	9,5
Nº 4	0,84	0,08	0,77	0,10	5,84	1,75	99,46	14,92	83,45	25,04	100,00	2,00	43,89	28	60	4,8
Nº 10	0,82	0,08	0,62	0,08	2,39	0,72	96,11	14,42	58,60	17,58	100,00	2,00	34,88	20	45	2
Nº 40	0,75	0,08	0,51	0,07	1,59	0,48	68,80	10,32	31,72	9,52	100,00	2,00	22,45	10	32	0,42
Nº 80	0,60	0,06	0,38	0,05	1,12	0,34	18,68	2,80	16,76	5,03	100,00	2,00	10,28	8	20	0,18
Nº 200	0,39	0,04	0,25	0,03	0,71	0,21	4,08	0,61	7,33	2,20	97,00	1,94	5,04	3	8	0,074



## Anexo C – Curva de Fuller – Mistura Superior

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL LEP - LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS MISTURA DE PROJETO SUPERIOR																
PENEIRAS	PORCENTAGEM PASSANDO - MISTURA DE PROJETO SUPERIOR IS															
	BRITA 25		BRITA 19		BRITA 12.5		AREIA		PÓ DE PEDRA		FILLER		PROJETO	ESPECIFICAÇÃO		
	TOTAL	3%	TOTAL	11%	TOTAL	28%	TOTAL	27%	TOTAL	29,0%	TOTAL	2%		Faixa B		
1 1/2"	100,00	3,00	100,00	11,00	100,00	28,00	100,00	27,00	100,00	29,00	100,00	2,00	100,00	100	100	38,1
1"	99,73	2,99	100,00	11,00	100,00	28,00	100,00	27,00	100,00	29,00	100,00	2,00	99,99	95	100	25,4
3/4"	58,85	1,77	93,93	10,33	100,00	28,00	100,00	27,00	100,00	29,00	100,00	2,00	98,10	80	100	19,1
1/2"	5,41	0,16	35,27	3,88	95,07	26,62	100,00	27,00	100,00	29,00	100,00	2,00	88,66			12,7
3/8"	1,30	0,04	7,37	0,81	62,12	17,39	99,86	26,96	96,97	28,12	100,00	2,00	75,33	45	80	9,5
Nº 4	0,84	0,03	0,77	0,08	5,84	1,64	99,46	26,85	83,45	24,20	100,00	2,00	54,80	28	60	4,8
Nº 10	0,82	0,02	0,62	0,07	2,39	0,67	96,11	25,95	58,60	16,99	100,00	2,00	45,71	20	45	2
Nº 40	0,75	0,02	0,51	0,06	1,59	0,45	68,80	18,58	31,72	9,20	100,00	2,00	30,30	10	32	0,42
Nº 80	0,60	0,02	0,38	0,04	1,12	0,31	18,68	5,04	16,76	4,86	100,00	2,00	12,28	8	20	0,18
Nº 200	0,39	0,01	0,25	0,03	0,71	0,20	4,08	1,10	7,33	2,13	97,00	1,94	5,41	3	8	0,074



## Anexo D – Mistura de Projeto – Curva Inferior

Teor de Ligante do Grupo (%)	4,25									
Desidade Máxima Teórica - DMT	2,538									
DESCRIÇÃO	RELAÇÃO	RESULTADOS								
		8 Giros-CP1	8 Giros - CP2	8 Giros - média	100 Giros - CP1	100 Giros -CP2	100 Giros - média	160 Giros - CP1	160 Giros -CP2	160 Giros - média
Massa Seca -MS (g)	-	1201,8	1198,1		1197,2	1197,9		1203,4	1193	
Massa Submersa - Ms sub (g)	-	703,9	701		710	711,5		714,7	711,6	
Volume - V	MS (g) - Ms sub (g)	497,9	497,1		487,2	486,4		488,7	481,4	
Média das alturas		74,3	74,1		66,475	66,97		65,675	6,47	
Média dos diâmetros		100,4	93,8		99,78	96,50		99,63	97,33	
Vmx	$(\pi \cdot d^2 \cdot hx) / 4 \cdot 0,001$	588,13	512,07		519,75	489,78		511,95	48,14	
Densidade (estimada) - Gmb	MS (g) / Vmx	2,04	2,34		2,30	2,45		2,35	24,78	
Coefficiente de correção	Gmb(medida)/Gmb(estimada) - Nmáximo	1,18	1,03		1,07	1,01		1,05	0,10	
Gmb (corrigida)	Cx Gmbn(estimada)	2,41	2,41		2,46	2,46		2,46	2,48	
Volume de Vazios -Vv	( 100-%Gmm)	4,90	5,04	4,97	3,18	2,96	3,07	2,98	2,36	2,67
Vazios do Agregado Mineral - VAM	$(100 - (\text{mm} @ \text{Nprojeto} \times \text{Gmm} \times \text{P} / \text{Gsb})) / \text{Gsb}$	15,35	15,48	15,42	13,78	13,59	13,68	13,60	13,05	13,32
Relação das Betume/Vazios -RBV	VAMestimado-4/VAMest	73,64	73,81	73,72	71,14	70,78	70,96	70,81	69,72	70,26
%Gmm		95,10	94,96	95,03	96,82	97,04	96,93	97,02	97,64	97,33
Densidade medida	MM/Vs	2,41	2,41		2,46	2,46		2,46	2,48	
Percentagem de agregado		0,958	0,958		0,958	0,958		0,958	0,958	
Gsb		2,73	2,73		2,73	2,73		2,73	2,73	
PI(estimado)	$PI - [0,4 \cdot (4 - Vv)]$	4,61	4,66	4,64	3,92	3,84	3,88	3,84	3,59	3,72
C		0,20	0,20		0,10	0,10		0,10	0,10	
Vam estimado	VAMI+C*(4-Vv)	15,17	15,27	15,22	13,86	13,69	13,78	13,70	13,21	13,46
%Gmmestimada@	%Gmm,tent@inicial-(4-Vv)	94,18	94,04	94,11	96,00	96,00	96,00	96,09	96,71	96,40
Ple estimado	$-(\text{Pag} \cdot \text{G}) \cdot (\text{Gse} - \text{Gsb}) / (\text{Gsex} \cdot \text{Gsb}) + \text{PI}$	4,61	4,66	4,64	3,92	3,84	3,88	3,84	3,59	3,72
Gse		2,64	2,64		2,64	2,64		2,64	2,64	
P/A		0,93	0,92	0,92	1,09	1,11	1,10	1,11	1,19	1,15



## Anexo E – Mistura de Projeto – Curva Intermediária

Teor de Ligante do Grupo (%)	4,25									
Desidade Máxima Teórica - DMT	2,551									
DESCRIÇÃO	RELAÇÃO	RESULTADOS								
		8 Giros-CP1	8 Giros - CP2	8 Giros - média	100 Giros - CP1	100 Giros -CP2	100 Giros - média	160 Giros - CP1	160 Giros -CP2	160 Giros - média
Massa Seca -MS (g)	-	1205,5	1193,3		1200,5	1192,1		1199,3	1196	
Massa Submersa - Ms sub (g)	-	686,9	679,6		710,7	705,6		714,3	710,6	
Volume - V	MS (g) - Ms sub (g)	518,6	513,7		489,8	486,5		485	485,4	
Média das alturas		64,8	63,7		65,55	64,42		63,025	63,55	
Média dos diâmetros		99,8	97,5		100,10	98,17		99,80	96,67	
Vmx	$(\pi \cdot d^2 \cdot hx) / 4 \cdot 0,001$	506,65	475,22		515,86	487,55		493,02	466,40	
Densidade (estimada) - Gmb	MS (g) / Vmx	2,38	2,51		2,33	2,45		2,43	2,56	
Coefficiente de correção	Gmb(medida)/Gmb(estimada) - N máximo	0,98	0,93		1,05	1,00		1,02	0,96	
Gmb (corrigida)	Cx Gmbn(estimada)	2,32	2,32		2,45	2,45		2,47	2,46	
Volume de Vazios -Vv	( 100-%Gmm)	8,88	8,94	8,91	3,92	3,95	3,93	3,07	3,41	3,24
Vazios do Agregado Mineral - VAM	$(100-(mm@Nprojeto \times Gmm \times Pag) / GSB)$	18,48	18,54	18,51	14,00	14,02	14,01	13,24	13,55	13,39
Relação das Betume/Vazios -RBV	VAM estimado-4/VAMest	77,15	77,21	77,18	71,45	71,49	71,47	69,99	70,60	70,30
%Gmm		91,12	91,06	91,09	96,08	96,05	96,07	96,93	96,59	96,76
Densidade medida	MM/Vs	2,32	2,32		2,45	2,45		2,47	2,46	
Porcentagem de agregado		0,958	0,958		0,958	0,958		0,958	0,958	
Gsb		2,73	2,73		2,73	2,73		2,73	2,73	
PI(estimado)	$PIi-[0,4 \cdot (4-Vv)]$	6,20	6,23	6,21	4,22	4,23	4,22	3,88	4,01	3,95
C		0,20	0,20		0,10	0,10		0,10	0,10	
Vam estimado	VAMi+C*(4-Vv)	17,51	17,55	17,53	14,01	14,03	14,02	13,33	13,61	13,47
%Gmmestimada@	%Gmm,tent@inicial-(4-Vv)	91,05	90,99	91,02	96,00	96,00	96,00	96,87	96,52	96,69
Ple estimado	$(-Pag \cdot GI) \cdot (Gse-Gsb) / (GsexGsb) + PI$	6,20	6,23	6,21	4,22	4,23	4,22	3,88	4,01	3,95
Gse		2,61	2,61		2,61	2,61		2,61	2,61	
P/A		0,81	0,81	0,81	1,19	1,19	1,19	1,30	1,26	1,28

## Anexo F – Mistura de Projeto – Curva Superior

Teor de Ligante do Grupo (%)	4,25									
Desidade Máxma Teórica - DMT	2,554									
DESCRIÇÃO	RELAÇÃO	RESULTADOS								
		8 Giros-CP1	8 Giros - CP2	8 Giros - média	100 Giros - CP1	100 Giros -CP2	100 Giros - média	160 Giros - CP1	160 Giros -CP2	160 Giros - média
Massa Seca -MS (g)	-	1200,7	1195,4		1204,6	1196,8		1199,3	1196,9	
Massa Submersa - Ms sub (g)	-	667,5	666,2		698,5	696		697,5	695	
Volume - V	MS (g) - Ms sub (g)	533,2	529,2		506,1	500,8		501,8	501,9	
Média das alturas		69,4	68,85		65,55	64,42		64,475	66,3	
Média dos diâmetros		99,9	97,67		100,10	98,17		99,88	98,17	
Vmx	$(\pi \cdot d^2 \cdot h \cdot x) / 4 \cdot 0,001$	543,98	515,81		515,86	487,55		505,12	501,80	
Densidade (estimada) - Gmb	MS (g) / Vmx	2,21	2,32		2,34	2,45		2,37	2,39	
Coefficiente de correção	Gmb(medida)/Gmb(estimada) - Nmáximo	1,02	0,97		1,02	0,97		1,01	1,00	
Gmb (corrigida)	Cx Gmbn(estimada)	2,25	2,26		2,38	2,39		2,39	2,38	
Volume de Vazios -Vv	( 100-%Gmm)	11,83	11,56	11,69	6,81	6,43	6,62	6,42	6,63	6,52
Vazios do Agregado Mineral - VAM	$(100 - (\text{mm} @ \text{Nprojeto} \times \text{Gmm} \times \text{Ppag}) / \text{GSB})$	21,03	20,78	20,91	16,49	16,15	16,32	16,14	16,33	16,23
Relação das Betume/Vazios -RBV	VAMestimado-4/VAMest	79,45	79,24	79,35	74,88	74,46	74,67	74,45	74,68	74,57
%Gmm		88,17	88,44	88,31	93,19	93,57	93,38	93,58	93,37	93,48
Densidade medida	MM/Vs	2,25	2,26		2,38	2,39		2,39	2,38	
Percentagem de agregado		0,958	0,958		0,958	0,958		0,958	0,958	
Gsb		2,73	2,73		2,73	2,73		2,73	2,73	
PI(estimado)	$Pli - [0,4 \cdot (4 - Vv)]$	7,38	7,27	7,33	5,37	5,22	5,30	5,22	5,30	5,26
C		0,20	0,20		0,20	0,20		0,20	0,20	
Vam estimado	VAMI+C*(4-Vv)	19,46	19,27	19,37	15,93	15,66	15,79	15,66	15,80	15,73
%Gmmestimada@	%Gmm,tent@inicial-(4-Vv)	90,79	91,06	90,93	96,00	96,00	96,00	96,20	95,99	96,09
Ple estimado	$-(\text{Pag} \cdot \text{G}) \cdot (\text{Gse} - \text{Gsb}) / (\text{Gsex} \cdot \text{Gsb}) + \text{PI}$	7,38	7,27	7,33	5,37	5,22	5,30	5,22	5,30	5,26
Gse		2,59	2,59		2,59	2,59		2,59	2,59	
P/A		0,73	0,74	0,74	1,01	1,04	1,02	1,04	1,02	1,03



Anexo G – Mistura de Projeto – Curva Intermediária – Teor de 4,3%

Teor de Ligante do Grupo (%)	4,3									
Desidade Máxma Teórica - DMT	2,525									
DESCRIÇÃO	RELAÇÃO	RESULTADOS								
		8 Giros-CP1	8 Giros - CP2	8 Giros - média	100 Giros - CP1	100 Giros -CP2	100 Giros - média	160 Giros - CP1	160 Giros -CP2	160 Giros - média
Massa Seca -MS (g)	-	1195,4	1196,6		1201,7	1197		1202	1196,3	
Massa Submersa - Ms sub (g)	-	680,7	682,0		708,3	706,9		714,9	713	
Volume - V	MS (g) - Ms sub (g)	514,7	514,6		493,4	490,1		487,1	483,3	
Média das alturas		68,3	68,8		64,46	63,93		63,67	62,80	
Média dos diâmetros		99,7	99,8		99,77	99,70		99,80	99,87	
Vmx	$(\pi \cdot d^2 \cdot hx) / 4 * 0,001$	532,94	538,56		503,94	499,12		498,04	491,92	
Densidade (estimada) - Gmb	MS (g) / Vmx	2,24	2,22		2,38	2,40		2,41	2,43	
Coefficiente de correção	Gmb(medida)/Gmb(estimada) - Nmáximo	1,04	1,05		1,02	1,02		1,02	1,02	
Gmb (corrigida)	Cx Gmbn(estimada)	2,32	2,33		2,44	2,44		2,47	2,48	
Volume de Vazios -Vv	( 100-%Gmm)	8,02	7,91	7,96	3,54	3,27	3,41	2,27	1,97	2,12
Vazios do Agregado Mineral - VAM	$(100-(mm@NprojetoXGmmXPag)/GSB$	18,55	18,45	18,50	14,54	14,30	14,42	13,42	13,15	13,28
Relação das Betume/Vazios -RBV	VAMestimado-4/VAMest	77,46	77,37	77,41	72,58	72,18	72,38	70,56	70,04	70,30
%Gmm		91,98	92,09	92,04	96,46	96,73	96,59	97,73	98,03	97,88
Densidade medida	MM/Vs	2,32	2,33		2,44	2,44		2,47	2,48	
Percentagem de agregado		0,958	0,958		0,958	0,958		0,958	0,958	
Gsb		2,73	2,73		2,73	2,73		2,73	2,73	
Pl(estimado)	$Pl = [0,4*(4-Vv)]$	5,91	5,86	5,89	4,12	4,01	4,06	3,61	3,49	3,55
C		0,20	0,20		0,10	0,10		0,10	0,10	
Vam estimado	VAMi+C*(4-Vv)	17,75	17,67	17,71	14,59	14,38	14,48	13,59	13,35	13,47
%Gmmestimada@	%Gmm,tent@inicial-(4-Vv)	91,39	91,50	91,44	96,00	96,00	96,00	97,14	97,44	97,29
Ple estimado	$-(Pag*Gj)*(Gse-Gsb)/(GsexGsb)+Pl$	5,91	5,86	5,89	4,12	4,01	4,06	3,61	3,49	3,55
Gse		2,61	2,61		2,61	2,61		2,61	2,61	
P/A		0,85	0,86	0,86	1,22	1,26	1,24	1,40	1,45	1,42

Anexo H – Mistura de Projeto – Curva Intermediária – Teor de 3,8%

Teor de Ligante do Grupo (%)		3,8								
Desidade Máxma Teórica - DMT		2,564								
DESCRIÇÃO	RELAÇÃO	RESULTADOS								
		8 Giros-CP1	8 Giros - CP2	8 Giros - média	100 Giros - CP1	100 Giros -CP2	100 Giros - média	160 Giros - CP1	160 Giros -CP2	160 Giros - média
Massa Seca -MS (g)	-	1185,4	1198,1		1197,5	1194,7		1196,3	1196,1	
Massa Submersa - Ms sub (g)	-	673	675,9		707,2	702,3		705,5	706,5	
Volume - V	MS (g) - Ms sub (g)	512,4	522,2		490,3	492,4		490,8	489,6	
Média das alturas		70,4	69,8		63,77	64,10		64,27	64,03	
Média dos diâmetros		99,8	99,7		99,95	99,70		99,84	99,83	
Vmx	$(\pi \cdot d^2 \cdot hx) / 4 * 0,001$	550,34	545,16		500,32	500,43		503,10	501,24	
Densidade (estimada) - Gmb	MS (g) / Vmx	2,15	2,20		2,39	2,39		2,38	2,39	
Coefficiente de correção	Gmb(medida)/Gmb(estimada) - Nmáximo	1,07	1,04		1,02	1,02		1,03	1,02	
Gmb (corrigida)	Cx Gmbn(estimada)	2,31	2,29		2,44	2,43		2,44	2,44	
Volume de Vazios -Vv	(100-%Gmm)	9,77	10,52	10,15	4,74	5,37	5,06	4,94	4,72	4,83
Vazios do Agregado Mineral - VAM	$(100-(mm@Nprojeto \times Gmm \times P) / GSB)$	18,87	19,54	19,21	14,30	14,87	14,59	14,48	14,28	14,38
Relação das Betume/Vazios -RBV	VAMestimado-4/VAMest	77,42	78,07	77,74	71,74	72,59	72,17	72,01	71,71	71,86
%Gmm		90,23	89,48	89,85	95,26	94,63	94,94	95,06	95,28	95,17
Densidade medida	MM/Vs	2,31	2,29		2,44	2,43		2,44	2,44	
Percentagem de agregado		0,958	0,958		0,958	0,958		0,958	0,958	
Gsb		2,73	2,73		2,73	2,73		2,73	2,73	
Pl(estimado)	$Pl = [0,4 * (4 - Vv)]$	6,11	6,41	6,26	4,10	4,35	4,22	4,17	4,09	4,13
C		0,20	0,20		0,20	0,20		0,20	0,20	
Vam estimado	VAMI+C*(4-Vv)	17,72	18,24	17,98	14,15	14,59	14,37	14,29	14,14	14,21
%Gmmestimada@	%Gmm,tent@inicial-(4-Vv)	91,28	90,54	90,91	96,00	96,00	96,00	96,12	96,34	96,23
Ple estimado	$-(Pag * Gl) * (Gse - Gsb) / (GsexGsb) + Pl$	6,11	6,41	6,26	4,10	4,35	4,22	4,17	4,09	4,13
Gse		2,61	2,61		2,61	2,61		2,61	2,61	
P/A		0,82	0,79	0,81	1,23	1,16	1,19	1,21	1,23	1,22



Anexo I – Mistura de Projeto – Curva Intermediária – Teor de 4,8%

Teor de Ligante do Grupo (%)	4,8									
Desidade Máxma Teórica - DMT	2,500									
DESCRIÇÃO	RELAÇÃO	RESULTADOS								
		8 Giros-CP1	8 Giros - CP2	8 Giros - média	100 Giros - CP1	100 Giros -CP2	100 Giros - média	160 Giros - CP1	160 Giros -CP2	160 Giros - média
Massa Seca -MS (g)	-	1202,5	1200,0		1203,5	1200		1205,8	1201,4	
Massa Submersa - Ms sub (g)	-	691,7	690,0		715,3	714		722,3	717,0	
Volume - V	MS (g) - Ms sub (g)	510,8	510		488,2	486		483,5	484,4	
Média das alturas		69,4	68,9		64,46	63,93		63,35	62,90	
Média dos diâmetros		100,0	99,9		99,77	99,70		100,03	99,87	
Vmx	$(\pi \cdot d^2 \cdot hx) / 4 \cdot 0,001$	545,07	540,68		503,94	499,12		497,88	492,70	
Densidade (estimada) - Gmb	MS (g) / Vmx	2,21	2,22		2,39	2,40		2,42	2,44	
Coefficiente de correção	Gmb(medida)/Gmb(estimada) - Nmáximo	1,07	1,06		1,03	1,03		1,03	1,02	
Gmb (corrigida)	Cx Gmbn(estimada)	2,35	2,35		2,47	2,47		2,49	2,48	
Volume de Vazios -Vv	( 100-%Gmm)	5,83	5,88	5,86	1,39	1,23	1,31	0,24	0,79	0,52
Vazios do Agregado Mineral - VAM	$(100 - (\text{mm} @ \text{Nprojeto} \times \text{Gmm} \times \text{XPag})) / \text{GSB}$	17,44	17,48	17,46	13,50	13,36	13,43	12,50	12,98	12,74
Relação das Betume/Vazios -RBV	VAMestimado-4/VAMest	76,57	76,62	76,60	70,94	70,68	70,81	68,92	69,92	69,42
%Gmm		94,17	94,12	94,14	98,61	98,77	98,69	99,76	99,21	99,48
Densidade medida	MM/Vs	2,35	2,35		2,47	2,47		2,49	2,48	
Percentagem de agregado		0,958	0,958		0,958	0,958		0,958	0,958	
Gsb		2,73	2,73		2,73	2,73		2,73	2,73	
PI(estimado)	$PIi - [0,4 \cdot (4 - Vv)]$	5,53	5,55	5,54	3,76	3,69	3,73	3,30	3,52	3,41
C		0,20	0,20		0,10	0,10		0,10	0,10	
Vam estimado	VAMI+C*(4-Vv)	17,08	17,11	17,09	13,76	13,64	13,70	12,87	13,30	13,08
%Gmmestimada@	%Gmm,tent@inicial-(4-Vv)	91,48	91,43	91,46	96,00	96,00	96,00	97,07	96,52	96,80
Ple estimado	$-(\text{Pag} \cdot \text{Gl}) \cdot (\text{Gse} - \text{Gsb}) / (\text{Gsex} \cdot \text{Gsb}) + \text{PI}$	5,53	5,55	5,54	3,76	3,69	3,73	3,30	3,52	3,41
Gse		2,61	2,61		2,61	2,61		2,61	2,61	
PIA		0,91	0,91	0,91	1,34	1,36	1,35	1,53	1,43	1,48



Anexo J – Mistura de Projeto – Curva Intermediária – Teor de 5,3%

Teor de Ligante do Grupo (%)		5,3								
Desidade Máxma Teórica - DMT		2,488								
DESCRIÇÃO	RELAÇÃO	RESULTADOS								
		8 Giros-CP1	8 Giros - CP2	8 Giros - média	100 Giros - CP1	100 Giros -CP2	100 Giros - média	160 Giros - CP1	160 Giros -CP2	160 Giros - média
Massa Seca -MS (g)	-	1198,5	1199,5		1196,8	1199,1		1.195,1	1.205,5	
Massa Submersa - Ms sub (g)	-	694,3	693,0		713,2	712,2		715,3	720,1	
Volume - V	MS (g) - Ms sub (g)	504,2	506,5		483,6	486,9		479,8	485,4	
Média das alturas		68,9	68,7		63,35	63,82		62,27	63,33	
Média dos diâmetros		100,3	99,9		100,02	100,28		100,15	100,20	
Vmx	$(\pi \cdot d^2 \cdot hx) / 4 * 0,001$	544,52	537,87		497,72	504,06		490,51	499,41	
Densidade (estimada) - Gmb	MS (g) / Vmx	2,20	2,23		2,40	2,38		2,44	2,41	
Coefficiente de correção	Gmb(medida)/Gmb(estimada) - Nmáximo	1,08	1,06		1,03	1,04		1,02	1,03	
Gmb (corrigida)	Cx Gmbn(estimada)	2,38	2,37		2,47	2,46		2,49	2,48	
Volume de Vazios -Vv	(100-%Gmm)	4,46	4,81	4,64	0,53	1,02	0,77	-0,11	0,18	0,03
Vazios do Agregado Mineral - VAM	$(100-(mm@Nprojeto \times Gmm \times P) / GSB)$	16,64	16,95	16,79	13,17	13,59	13,38	12,60	12,86	12,73
Relação das Betume/Vazios -RBV	VAMestimado-4/VAMest	75,83	76,17	76,00	70,40	71,20	70,80	69,27	69,79	69,53
%Gmm		95,54	95,19	95,36	99,47	98,98	99,23	100,11	99,82	99,97
Densidade medida	MM/Vs	2,38	2,37		2,47	2,46		2,49	2,48	
Percentagem de agregado		0,958	0,958		0,958	0,958		0,958	0,958	
Gsb		2,73	2,73		2,73	2,73		2,73	2,73	
PI(estimado)	$PII-[0,4*(4-VV)]$	5,48	5,63	5,55	3,91	4,11	4,01	3,65	3,77	3,71
C		0,20	0,20		0,10	0,10		0,10	0,10	
Vam estimado	VAMI+C*(4-Vv)	16,55	16,79	16,67	13,51	13,89	13,70	13,01	13,24	13,13
%Gmmestimada@	%Gmm,tent@inicial-(4-Vv)	92,31	91,96	92,14	96,00	96,00	96,00	96,89	96,59	96,74
Ple estimado	$(-(Pag*GI)*(Gse-Gsb)/(GsexGsb)+PI)$	5,48	5,63	5,55	3,91	4,11	4,01	3,65	3,77	3,71
Gse		2,61	2,61		2,61	2,61		2,61	2,61	
P/A		0,92	0,90	0,91	1,29	1,23	1,26	1,38	1,34	1,36

# APÊNDICES

---

## Apêndice A – Composição Granulométrica da Curva Inferior

### SOFTPAVE

Nome do projeto: Dosagem Duperpave

Projetado por Alan Barbosa Cavalcanti

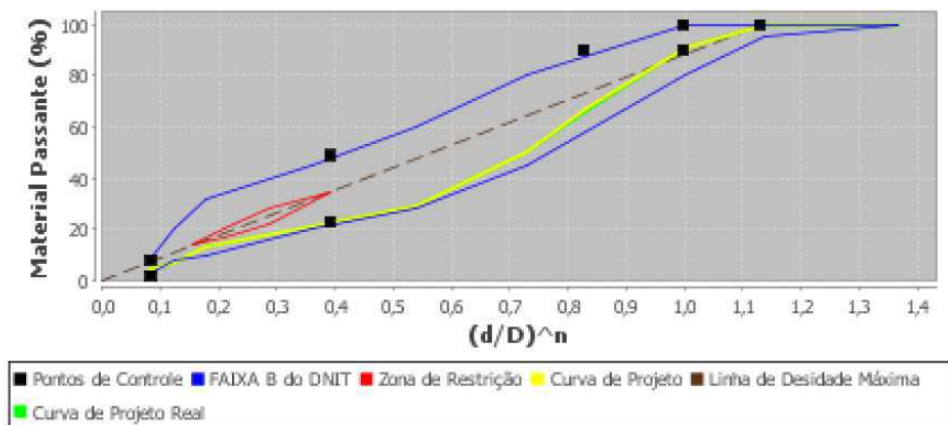
Laboratório: Laboratório de Engenharia de Pavimentos - LEP/UFCG

Data: 01/04/2014

### PROJETO SUPERPAVE: Granulometria da Curva Inferior

Percentagens para Curva Inferior					
Brita 25	Brita 12.5	Brita 19	Areia	Pó de Pedra	Cal
20 %	20 %	29 %	4 %	25 %	2 %

### CURVA DE FULLER - GRANULOMETRIA INFERIOR



## Apêndice B – Composição Granulométrica da Curva Intermediária

### SOFTPAVE

Nome do projeto: Dosagem Duperpave

Projetado por Alan Barbosa Cavalcanti

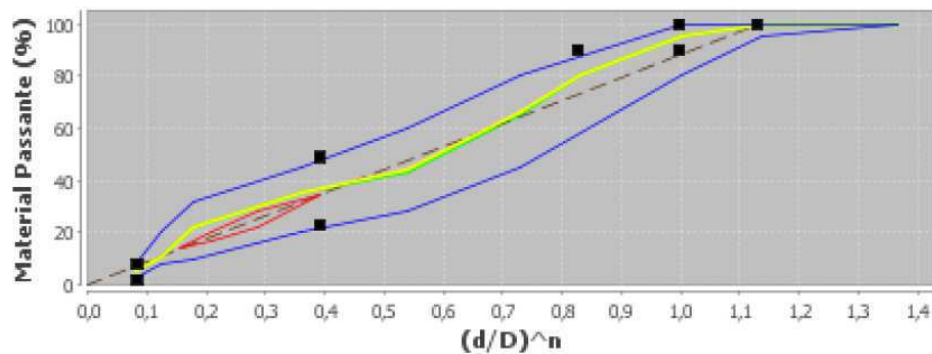
Laboratório: Laboratório de Engenharia de Pavimentos - LEP/UFPG

Data: 01/04/2014

### PROJETO SUPERPAVE: Granulometria da Curva Intermediária

Percentagens para Curva Intermediária					
Brita 25	Brita 12.5	Brita 19	Areia	Pó de Pedra	Cal
10 %	13 %	30 %	15 %	30 %	2 %

### CURVA DE FULLER - GRANULOMETRIA INTERMEDIÁRIA



## Apêndice C – Composição Granulométrica da Curva Superior

### **SOFTPAVE**

Nome do projeto: Dosagem Duperpave

Projetado por Alan Barbosa Cavalcanti

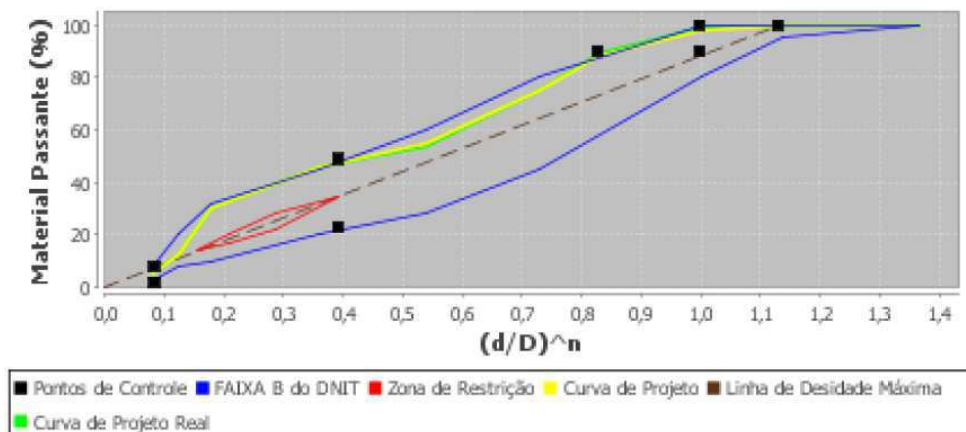
Laboratório: Laboratório de Engenharia de Pavimentos - LEP/UFMG

Data: 01/04/2014

### PROJETO SUPERPAVE: Granulometria da Curva Superior

Percentagens para Curva Superior					
Brita 25	Brita 12.5	Brita 19	Areia	Pó de Pedra	Cal
3 %	11 %	28 %	27 %	29 %	2 %

### CURVA DE FULLER - GRANULOMETRIA SUPERIOR



## Apêndice D – Relatório final de dosagem emitido pelo SOFTPAVE

### **SOFTPAVE**

---

Nome do projeto: Dosagem Superpave

Projetado por Alan Barbosa Cavalcanti

Laboratório: Laboratório de Engenharia de Pavimentos - LEP/UFCG

Data: 02/04/2014

### **PROJETO SUPERPAVE: Relatório Final**

#### **1) Dados do Projeto**

Nome do Projeto = Dosagem Superpave

Projetado por = Alan Barbosa Cavalcanti

Laboratório = Laboratório de Engenharia de Pavimentos - LEP/UFCG

Data = 02/05/2013

Outras Informações = O objetivo deste projeto é apresentar um exemplo de dosagem para a dissertação de Mestrado

Faixa de Trabalho = FAIXA B

Tráfego (ESALs) = 10 a < 30 (10<sup>6</sup>)

Espessura do Pavimento = > 100 mm

=====

AGREGADO: Brita 25

Granulometria (Porcentagens passantes):

11/2" = 100 %

1" = 99.73 %

3/4" = 58.85 %

1/2" = 5.41 %

3/8" = 1.3 %

Nº4 = 0.84 %

Nº10 = 0.82 %

Nº40 = 0.75 %

Nº80 = 0.60 %

Nº200 = 0.39 %

Peso Específico Real: 2.7426 kN/m<sup>3</sup>

Peso Específico Aparente: 2.7191 kN/m<sup>3</sup>

Tamanho Nominal Máximo: 25 mm

Absorção: 0.2 %

Adesividade: Satisfaz

Índice de Forma: 1

Angularidade (uma superfície fraturada): 90 %

Angularidade (duas superfícies fraturadas): 80 %

Partículas Alongadas: 5 %

Abrasão Los Angeles: 20 %

=====

AGREGADO: Brita 12.5

Granulometria (Porcentagens passantes):

11/2" = 100 %

1" = 100 %

3/4" = 93.93 %

1/2" = 35.27 %

3/8" = 7.37 %

Nº4 = 0.77 %

Nº10 = 0.62 %

Nº40 = 0.51 %

Nº80 = 0.38 %

Nº200 = 0.25 %

Peso Específico Real: 2.7479 kN/m<sup>3</sup>

Peso Específico Aparente: 2.7188 kN/m<sup>3</sup>

Tamanho Nominal Máximo: 19 mm

Absorção: 0.2 %

Adesividade: Satisfaz

Índice de Forma: 1

Angularidade (uma superfície fraturada): 90 %

Angularidade (duas superfícies fraturadas): 80 %

Partículas Alongadas: 5 %

Abrasão Los Angeles: 20 %

=====

AGREGADO: Brita 19

Granulometria (Porcentagens passantes):

11/2" = 100 %

1" = 100 %

3/4" = 100 %

1/2" = 95.07 %

3/8" = 62.12 %

Nº4 = 5.84 %

Nº10 = 2.39 %

Nº40 = 1.59 %

Nº80 = 1.12 %

Nº200 = 0.71 %

Peso Específico Real: 2.7558 kN/m<sup>3</sup>

Peso Específico Aparente: 2.722 kN/m<sup>3</sup>

Tamanho Nominal Máximo: 12 mm

Absorção: 0.2 %

Adesividade: Satisfaz

Índice de Forma: 1

Angularidade (uma superfície fraturada): 90 %  
Angularidade (duas superfícies fraturadas): 80 %  
Partículas Alongadas: 5 %  
Abrasão Los Angeles: 20 %

=====

AGREGADO: Areia

Granulometria (Porcentagens passantes):

1 1/2" = 100 %  
1" = 100 %  
3/4" = 100 %  
1/2" = 100 %  
3/8" = 99.86 %  
Nº4 = 99.46 %  
Nº10 = 96.11 %  
Nº40 = 68.80 %  
Nº80 = 18.68 %  
Nº200 = 4.08 %

Peso Específico Real: 2.5433 kN/m<sup>3</sup>  
Peso Específico Aparente: 2.5405 kN/m<sup>3</sup>  
Equivalente Areia: 95 %  
Angularidade: 40 %

=====

AGREGADO: Pó de Pedra

Granulometria (Porcentagens passantes):

1 1/2" = 100 %  
1" = 100 %  
3/4" = 100 %  
1/2" = 100 %  
3/8" = 96.97 %  
Nº4 = 83.45 %  
Nº10 = 58.6 %  
Nº40 = 31.72 %  
Nº80 = 16.76 %  
Nº200 = 7.33 %

Peso Específico Real: 2.4354 kN/m<sup>3</sup>  
Peso Específico Aparente: 2.4306 kN/m<sup>3</sup>  
Equivalente Areia: 60 %  
Angularidade: 40 %

=====



FILER: Cal

Granulometria (Porcentagem passante):

Nº200 = 97 %

Peso Específico Real: 2.24 kN/m<sup>3</sup>

Peso Específico Aparente: 2.238 kN/m<sup>3</sup>

=====  
Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

Cap Original =====

Ponto de Amolecimento: 60 °C

Ponto de Fulgor = 250 °C

Massa Específica = 1.027 g/cm<sup>3</sup>

Penetração = 60 dmm

RTFO =====

Perda de Massa = 0.7 %

DSR =====

Virgem (G\*/sen) = 1.2 KPa

Após RTFO (G\*/sen) = 2.5 KPa

Após PAV (G\*/sen) = 1500 KPa

BBR =====

S = 100 MPa

m = 0.5

Viscosidade =====

Tipo = Saybolt Furol (< temperatura do ligante)

Tempo 1 = 193.0

Tempo 2 = 70.0

Tempo 3 = 30.0

Temperatura do Ligante = 139.23 °C

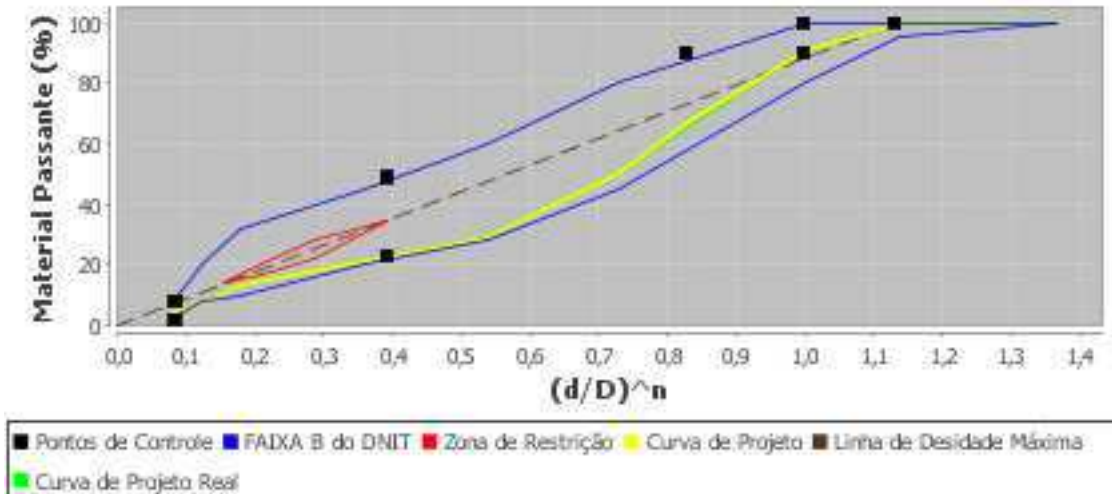
Temperatura do Agregado = 139.23 até 152.23 °C

Temperatura de Compactação = 152.36 °C

## 2) Composição Granulométrica

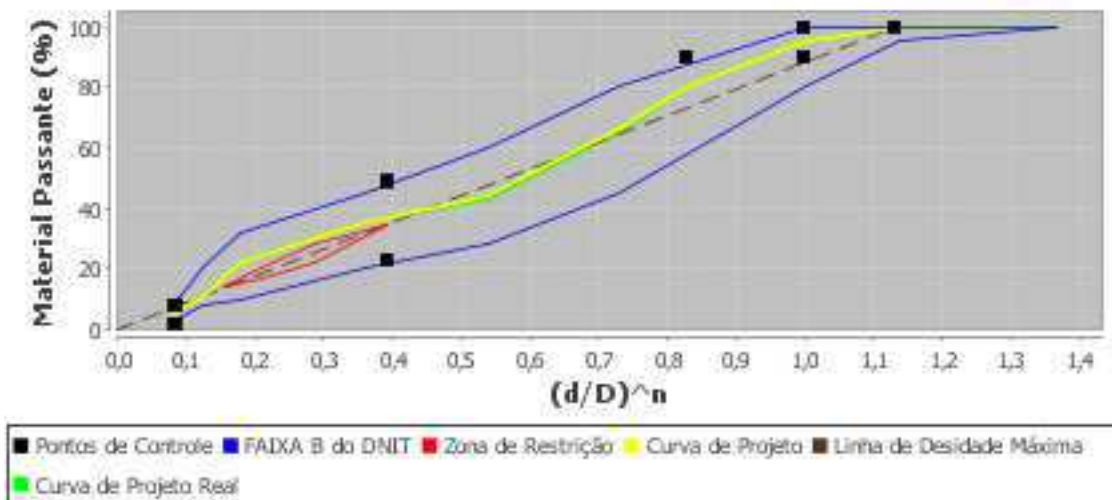
Percentagens para Curva Inferior					
Brita 25	Brita 12.5	Brita 19	Areia	Pó de Pedra	Cal
20 %	20 %	29 %	4 %	25 %	2 %

### CURVA DE FULLER - GRANULOMETRIA INFERIOR



Percentagens para Curva Intermediária					
Brita 25	Brita 12.5	Brita 19	Areia	Pó de Pedra	Cal
10 %	13 %	30 %	15 %	30 %	2 %

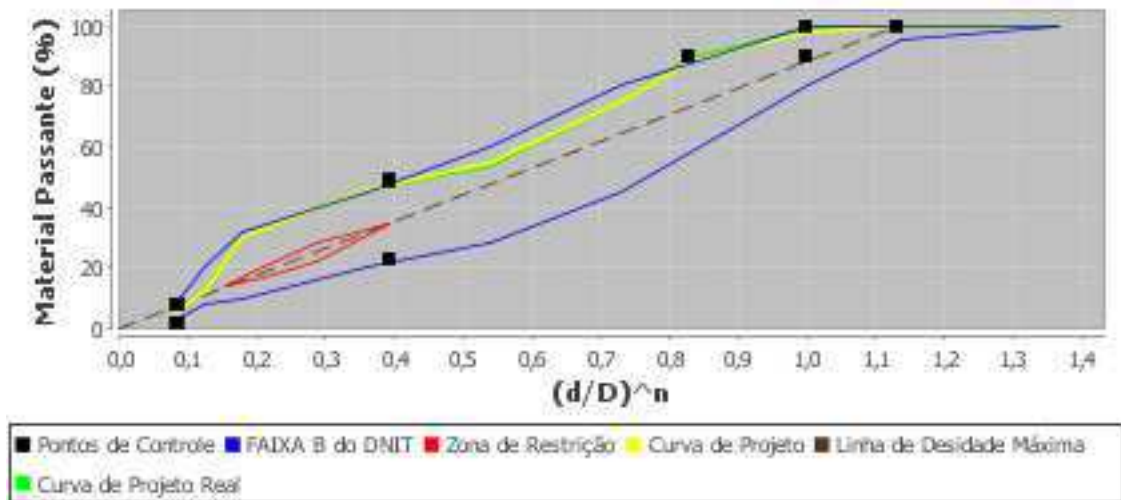
### CURVA DE FULLER - GRANULOMETRIA INTERMEDIÁRIA



Percentagens para Curva Superior					
Brita 25	Brita 12.5	Brita 19	Areia	Pó de Pedra	Cal

3 %	11 %	28 %	27 %	29 %	2 %
-----	------	------	------	------	-----

### CURVA DE FULLER - GRANULOMETRIA SUPERIOR



Percentagens Reais						
Inferior	20.0 %	20.01 %	29.14 %	3.96 %	25.01 %	2.01 %
Interm.	10.0 %	13.0 %	29.97 %	14.88 %	29.64 %	1.98 %
Superior	3.0 %	11.0 %	28.26 %	27.11 %	28.87 %	1.97 %

### 3) Ligante

Curva Inferior

Gsa: 2.6438

Gsb: 2.7

DMT: 2.538

Gse: 2.7271

Pba: 0.3774

Teor de Ligante Inicial: 4.1396

Curva Intermediária

Gsa: 2.6061

Gsb: 2.72

DMT: 2.551

Gse: 2.7428

Pba: 0.3137

Teor de Ligante Inicial: 4.2005

Curva Superior

Gsa: 2.5857

Gsb: 2.74

DMT: 2.554

Gse: 2.7464

Pba: 0.0876

Teor de Ligante Inicial: 4.4164

Tráfego: Médio a alto (vias principais / rodovias rurais)

Número de giros no CGS

N(inicial): 8

N(projeto): 100

N(máximo): 160

Valores Calculados a partir da moldagem preliminar

Curva Inferior

%Gmm(i): 94.11

%Gmm(p): 96

%Gmm(m): 96.4

%P/A: 1.34

%Vv: 3.07

%VAM: 12.66

%RBV: 68.63

Curva Intermediária

%Gmm(i): 91.02

%Gmm(p): 96

%Gmm(m): 96.69

%P/A: 1.21

%Vv: 3.93

%VAM: 18.1

Curva Superior

%Gmm(i): 90.83

%Gmm(p): 95.91

%Gmm(m): 96

%P/A: 0.92

%Vv: 6.62

%VAM: 16.56

**Curva escolhida = Intermediária**

Valores Calculados a partir da moldagem Teste

Teor Estimado

%Gmm(i): 91.5

%Gmm(p): 96

%Gmm(m): 97.27

%P/A: 1.09

%Vv: 4.5

%VAM: 14.67

%RBV: 72.55

Teor Estimado - 0.5%

%Gmm(i): 90.66

%Gmm(p): 95.77

%Gmm(m): 96

%P/A: 1.08

%Vv: 4.69

%VAM: 19.4

Teor Estimado + 0.5%

%Gmm(i): 91.55

%Gmm(p): 96

%Gmm(m): 96.78

%P/A: 1.21

%Vv: 3.4

%VAM: 13.69

Teor Estimado + 1%

%Gmm(i): 92.24

%Gmm(p): 96

%Gmm(m): 96.72

%P/A: 1.21

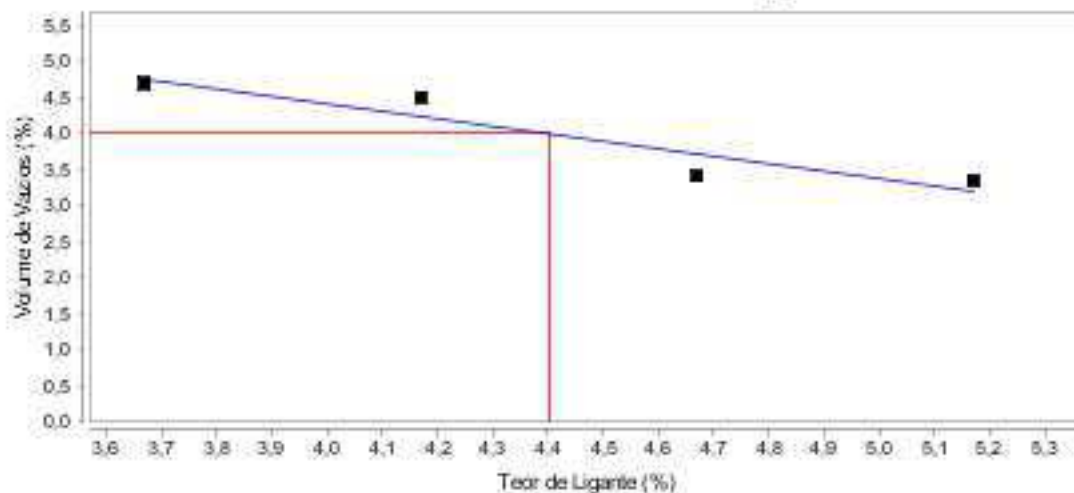
%Vv: 3.34

%VAM: 16.99

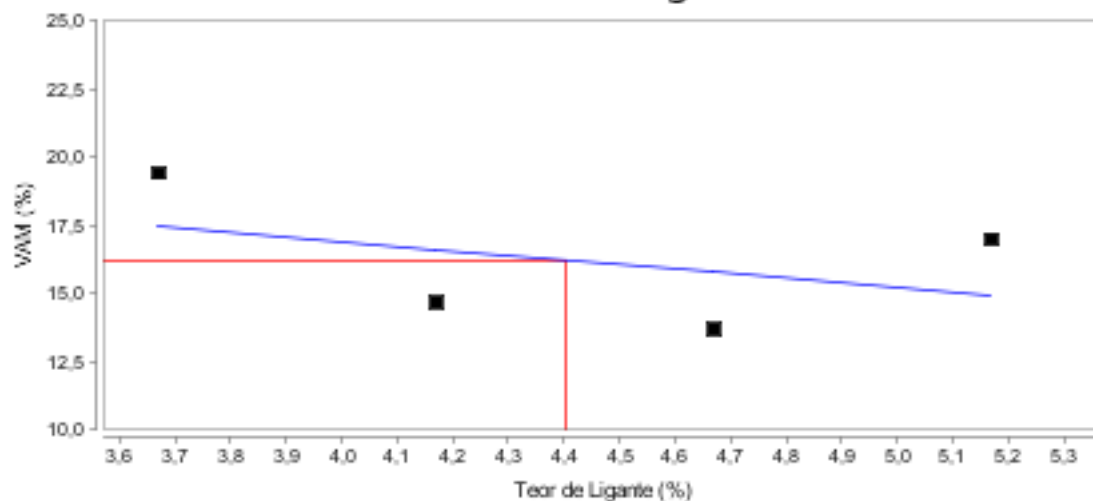
**Cálculo do Teor Ótimo de Projeto**

**Teor Ótimo de Ligante: 4.4**

### Volume de Vazios x Teor de Ligante

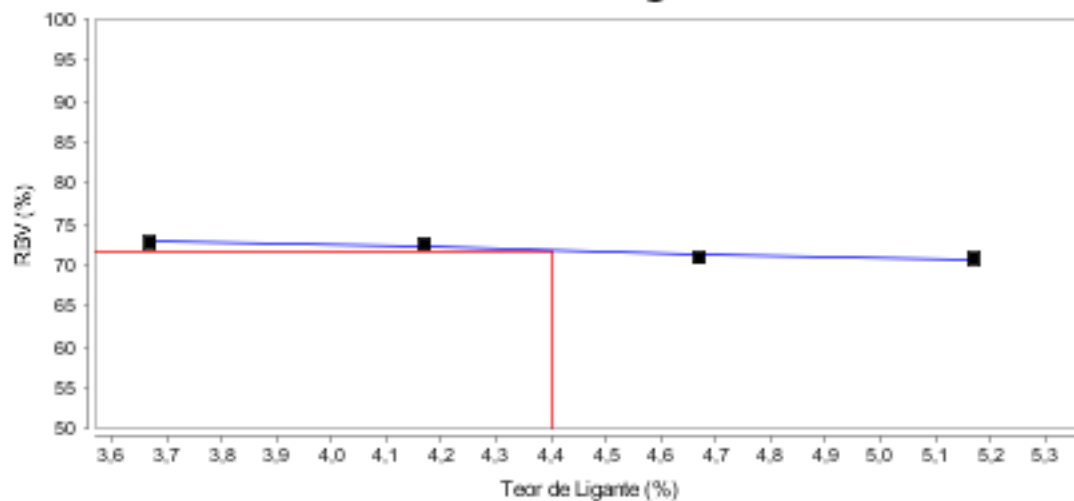


### VAM x Teor de Ligante



VAM: 16.22

### RBV x Teor de Ligante



RBV: 71.78

Valores reais da mistura com teor ótimo de ligante

%P/A:

%Vv:

%VAM:

%RBV:

## **Propriedades Mecânicas**

RT: MPa

Lottman: %

MR: MPa

Vida de Fadiga:

Creep Estático:

Creep Dinâmico: