

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Departamento de Engenharia Civil

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
MISTURAS ASFÁLTICAS COM CIMENTO ASFÁLTICO
DE PETRÓLEO MODIFICADO COM ÓLEO DE MAMONA**

LEONARDO JOSÉ SILVA DE SOUZA

Campina Grande
Data: MAIO / 2012

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

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM CIMENTO
ASFÁLTICO DE PETRÓLEO MODIFICADO COM ÓLEO DE MAMONA.**

Autor: Leonardo José Silva de Souza

LEP

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 2012

LEONARDO JOSÉ SILVA DE SOUZA

**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 2012



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S729e **Souza, Leonardo José Silva de.**
Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com cimento asfáltico de petróleo modificado com óleo de mamona / Leonardo José Silva de Souza. - Campina Grande, 2012.
101f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
Orientador: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues.
Referências.

1. Óleo de Mamona. 2. Asfaltos. 3. Misturas Asfálticas. I. Título.

CDU 633.85 (043)

DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG

FOLHA DE APROVAÇÃO

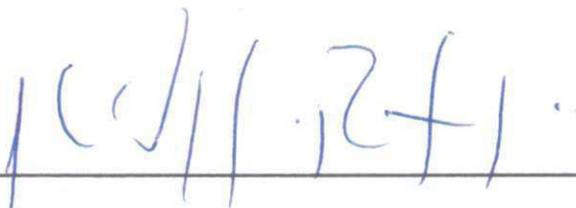
Autor: Leonardo José Silva Souza.

Título: Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado com Óleo de Mamona.

Dissertação defendida e aprovada em: 31/05/2012

Banca Examinadora

(Assinatura):



Prof. Dr. (Orientador) John Kennedy Guedes Rodrigues

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

(Assinatura):



Prof(a). Dra. (Examinadora Externo) Liedí Légi Bariani Bernucci

ESCÓLA POLITÉCNICA DA USP

(Assinatura):



Prof. Dr. (Examinador Interno) Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena

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

DEDICATÓRIA

A Deus e, principalmente, aos meus pais, que com muito amor me prepararam para a vida, mostrando que nada é fácil, mas que com esforço e determinação conquistamos nossos objetivos. Obrigado pelo amor e todo o apoio INCONDICIONAL.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por tudo o que Ele proporciona em minha vida.

À minha amada namorada Aneliése L. Figueiredo, pelo apoio, encorajamento e compreensão ao longo do mestrado.

As minhas amadas irmã e afilhada, Milen Maria e Lara Maria, e ao meu querido cunhado Daniel, por todo amor, carinho e respeito; foram de grande ajuda para que me mantivesse em equilíbrio.

Ao Professor Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues, pela orientação, por todo o aprendizado e compreensão ao longo deste Mestrado. Foi o responsável por grande parte do aprendizado obtido ao longo desse tempo, obrigado por todo o conhecimento transmitido.

Aos meus amigos do Laboratório, Arimatéia, Leda, Jadilson, Johny, Daniel, Manuel Gualberto e Tairone, que me ajudaram na realização de ensaios, na compreensão dos conhecimentos técnicos e nos momentos em que me senti perdido.

Ao professor Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena, que foi mais um responsável por todo o desenvolvimento da pesquisa e um verdadeiro técnico de manutenção do Servopac.

Às minhas queridas e amadas avós Maria Rodrigues de Souza e Maria de Nazaré, por todos os momentos de alegria que compartilhamos juntos e a fé em mim depositada.

Aos meus Tios, Tias e Primos, pela grande torcida e confiança. “Saudações ao Crato!!!.”

Aos amigos Rander Campos Moreira, Flaviano Alves, Salomão Alves, Lucas Ribeiro, Rodrigo Patrício, Eber G. Lima, Antônio Lopes Neto (Tonin), Leonardo Carvalho (Diretor Presidente), Breno Vanderley e José Nunes, pessoas maravilhosas com quem compartilhei esse grande momento da minha vida. Desejo que nossa amizade perdure para sempre.

Aos colegas de Mestrado, Valquiria, Libânea, Alessandra, Karine, Fabiano Queiroz, Daniel de Britto, Larissa, João Neto, Ester, Dennyelle. “Obrigado por me aguentarem”.

Aos colegas do residencial Vila Bella, do “AP do sucesso” e do “Recanto Abençoado”, que se tornaram grandes amigos.

À LUBNOR, por conceder o CAP utilizado na pesquisa.

Ao Professor Gilmar e ao amigo José Carvalho, por concederem a matéria prima utilizada e sempre esclarecerem as dúvidas quanto ao comportamento químico da mistura.

À CAPES, pela bolsa concedida.

À Atecel – Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Junior, por todo o incentivo, assistência e companheirismo nos serviços técnicos.

À Rede Asfalto, pelo comprometimento e incentivo à pesquisa na área de pavimentação.

A todos que, de alguma forma, ajudaram na conclusão deste trabalho: Professor Gilmar, Tico engenheiro de usina, Professor Edmar, Professor Milton Bezerra e a Professora Veruschka.

RESUMO

A busca de métodos produtivos de pavimentação asfáltica mais eficientes, que otimizem a utilização dos recursos naturais e minimizem os impactos nocivos destas atividades sobre o meio ambiente, é uma preocupação global, a qual tem como foco principal um desenvolvimento sustentável. A utilização de cimentos asfálticos de petróleo com agentes modificadores pode gerar a redução de custos na manutenção de pavimentos e na diminuição do consumo de energia e da poluição ambiental. É exatamente na variável “CAP” que é centrada a presente pesquisa, onde foram utilizados o método de Dosagem Superpave e os estudos das propriedades físicas, mecânicas e de estado dos materiais e das misturas asfálticas, com o objetivo de verificar a viabilidade técnica do uso do óleo de Mamona como aditivo verde. Com base nas metodologias de ensaios preconizados pelo DNIT, pela AASHTO e pela ASTM, destacando-se os ensaios de Viscosidade Brookfield, de Lottman Modificado e de Módulo de Resiliência, foi possível verificar a eficiência energética de misturas asfálticas (Faixa C do DNIT) compostas com um percentual de cinco por cento (5%) de óleo de mamona em relação ao CAP, o qual gerou uma diminuição das temperaturas de usinagem, de agregados e de compactação em média de oito graus centígrados (8 °C). Os resultados indicam que o óleo de mamona pode ser utilizado como aditivo verde, promovendo um menor impacto sobre o meio ambiente e uma diminuição dos custos de nove por cento (9%) no quantitativo de óleo BPF utilizado na confecção da mistura convencional.

PALAVRAS-CHAVE: Óleo de Mamona. Asfaltos. Misturas Asfálticas. Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT

Searching for more productive ways of paving, optimizing the use of natural resources, and limiting the impact of these activities on the environment is a global concern which has as main objective a sustainable development. Utilizing asphalt with modifying agents result in reduced costs when maintaining the pavement, decrease of energy consumption, and reduction of environmental pollution. This research is focused on the variable "CAP" where we used the Superpave method of dosing, the study of physical properties, mechanical properties, state of materials and modified asphalt mixtures. In order to verify the technical viability of using castor oil as an additive in asphalt mixtures. Based on tested methods recommended by DNIT, AASHTO, and ASTM highlighting the Brookfield Viscosity tests, and the Lottman Module Resilient, was possible to verify the efficiency of asphalt mixtures composed with a 5% percentage of castor oil in relation to the "CAP" which generated a reduction in machining temperature, adding and compacting an average of eight degrees Celsius (8°C). The results indicate that the castor oil can be utilized as a green additive causing a smaller impact on the environment and a reduction in machining costs by nine percent (9%) in quantitative BPF oil used in the manufacture of conventional mixture.

KEYWORDS: Bio oils. Asphalts Cements. Asphalt Mixtures. Pavements and Mechanical Properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Asfalto natural na ilha de Trinidad.	8
Figura 2-2 – Layout da forma de compactação e da estrutura do Compactador Giratório Superpave (CGS) [Fonte: SILVA, 2011].	15
Figura 2-3 - Granulometria de densidade máxima [Traduzido de ROBERT et al. 1996].	16
Figura 2-4 – Curva de Fuller & Thompson para representação da distribuição dos tamanhos das partículas de agregados para misturas asfálticas [Tamanho Nominal 25 mm: Traduzido de ROBERT et al. 1996].	18
Figura 2-5 - Ilustração dos componentes das misturas asfálticas que definem suas proporções relativas.	21
Figura 2-6 – “Layout” do procedimento para a realização do ensaio de Módulo de Resiliência em corpos de prova submetidos à tração indireta por compressão diametral [Fonte: SILVA, 2011].	24
Figura 2-7 – Layout do procedimento para realização do ensaio de Módulo Dinâmico (E*) sob carregamento de tensão na compressão [Fonte: SILVA, 2011].	25
Figura 2-8 – Tensão equivalente vertical versus profundidade da camada [Adaptado de MEPDG – AASHTO, (2008)].	26
Figura 2-9 – Modelo de previsão Witczak do Módulo Dinâmico para Misturas Asfáltica [CLYNE et al. (2003)].	26
Figura 2-10 - Estágios existentes em um processo de fadiga [Fonte: Bernucci et al. 2007].	28
Figura 2-11 - Vida de Fadiga considerando diferentes faixas granulométricas [Fonte: CERVO, 2004].	31
Figura 2-12 – Layout do estado de tensões gerado no ensaio de tração por compressão diametral [Fonte: ROHDE (2007)].	32
Figura 2-13 - Layout do procedimento para o ensaio de Lottman [Fonte: TANDON et al. (2003)].	35
Figura 3-1 - Ilustração dos agregados graúdos Brita 12,5 mm; Brita 19,0 mm.	47
Figura 3-2 - Forma de acondicionamento & Quarteamento prévio.	48
Figura 3-3 - Ilustração dos agregados miúdos: Areia de Campo e Pó-de-Pedra.	48
Figura 3-4 – Óleo de Mamona utilizado nas misturas asfálticas.	50
Figura 3-5 - Laboratório de Engenharia de Pavimentos LEP/DEC/UFCG.	50
Figura 3-6 - Série de peneiras; e peneiramento manual.	52
Figura 3-7 - Etapas do Ensaio de Absorção.	54
Figura 3-8 – Ensaio de abrasão “Los Angeles”.	55
Figura 3-9 – Penetrômetro & Banho para a amostra à 25°C.	56
Figura 3-10 - Viscosímetro Rotacional (Brookfield).	56
Figura 3-11 - Equipamento utilizados para a realização do ensaio de ponto de amolecimento.	57
Figura 3-12 - Misturador mecânico com controladores de temperatura e rotações.	58
Figura 3-13 – Compactador Giratório do Tipo SGC pertencente ao LEP.	61
Figura 3-14 – Equipamentos utilizados para a realização dos ensaios de RT.	62
Figura 3-15 - Equipamentos utilizados no ensaio de Lottman Modificado.	64
Figura 3-16 - Equipamentos Ensaio Módulo de Resiliência.	65

Figura 3-17 - Interface de trabalho do programa utilizado para realização do ensaio de Módulo de Resiliência.....	65
Figura 3-18 – Relatório gerado pelo programa utilizado para o processamento dos dados e cálculos do M_R	66
Figura 4-1 - Curvas Granulométricas dos agregados.	69
Figura 4-2 - Curva de Fuller da composição dos agregados [Limite Inferior da Faixa C do DNIT].	70
Figura 4-3 - Curvas de projeto <i>Teórica e Real</i> [Limite Inferior da Faixa C do DNIT].	70
Figura 4-4 - Curva de Fuller da composição dos agregados [Limite Intermediário da Faixa C do DNIT].	71
Figura 4-5 - Curvas de projeto <i>Teórica e Real</i> [Limite Intermediário da Faixa C do DNIT].	72
Figura 4-6 - Curva de Fuller da composição dos agregados [Limite Superior da Faixa C do DNIT]. ..	73
Figura 4-7 - Curvas de projeto <i>Teórica e Real</i> [Limite Superior da Faixa C do DNIT].	73
Figura 4-8 - Penetração em barras [Valores das Médias].	76
Figura 4-9 - Ponto de Amolecimento [Valores Individuais].	76
Figura 4-10 – Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura para os CAPs estudados.	78
Figura 4-11 – Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura [CAP Puro]....	79
Figura 4-12 - Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura [CAP + SBS]. ..	79
Figura 4-13 - Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura [CAP + 3% de óleo de Mamona].	79
Figura 4-14 - Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura [CAP + 5% de óleo de Mamona].	79
Figura 4-15 - Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura [CAP + 7% de óleo de Mamona].	80
Figura 4-16 - Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura [CAP + 9% de óleo de Mamona].	80
Figura 4-17 - Temperaturas de usinagem, de compactação e dos agregados utilizadas nesta pesquisa para compactação Superpave.	81
Figura 4-18 – Parâmetros da Dosagem Superpave para as misturas com os teores de CAP estimados.....	83
Figura 4-19 – Estimativa do teor de CAP de Projeto [Teor Ótimo de Projeto].	85
Figura 4-20 - Resistência à Tração Diametral em Barras [Valores Médios e Valores Individuais, respectivamente].	87
Figura 4-21 – RRT em barras, dos corpos de prova quanto ao ensaio de Lottman Modificado.....	89
Figura 4-22 – Módulos de Resiliência em Barras [Valores Valores Individuais e Médios, respectivamente].	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Pontos de controle de acordo com o tamanho máximo do agregado (SUPERPAVE).....	17
Tabela 2.2 – Zona de restrição de acordo com o tamanho máximo do agregado (SUPERPAVE).....	17
Tabela 2.3 – Recomendação Superpave para vazios de agregado mineral.	18
Tabela 2.4 - Principais modificadores utilizados em ligantes asfálticos e os defeitos que eles procuram evitar [Fonte: BAHIA et al. 1998].	38
Tabela 2.5 - Físicas Valores de Referência: Physical and Chemical Characteristics of Oils, Fats, and Waxes - AOCS. [Fonte: COSTA, 2006].....	43
Tabela 2.6 – Química do Óleo de Mamona [Fonte: MOSHKIN, 1986].	43
Tabela 2.7 – Evolução dos preços reais recebidos pelos produtores – Irecê – BA [Fonte: CONAB, 2012].....	45
Tabela 3.1 - Propriedades físicas do CAP utilizado na Pesquisa.	49
Tabela 3.2 - Ensaio e Normas de especificações Brasileiras.....	51
Tabela 4.1 - Distribuição dos tamanhos das partículas dos agregados.....	68
Tabela 4.2 – Composição dos agregados estabelecida com a aproximação do Limite Inferior [Faixa C do DNIT].....	69
Tabela 4.3 – Composição dos agregados estabelecida com a aproximação do Limite Intermediário [Faixa C do DNIT].	71
Tabela 4.4 – Composição dos agregados estabelecida com aproximação do Limite Superior [Faixa C do DNIT].	72
Tabela 4.5 - Peso específico real e aparente dos agregados graúdos utilizados nas misturas asfálticas.	74
Tabela 4.6 - Massa específica real dos agregados miúdos utilizados nas misturas asfálticas.	74
Tabela 4.7 - Resultado do ensaio de absorção.	75
Tabela 4.8 - Resultados do ensaio de penetração: CAP Puro; SBS; CAP + Óleo de Mamona variando de 2%,3%, 5%, 7%, 9% à 10% de adição do óleo.	75
Tabela 4.9 - Resultados do ensaio de ponto de amolecimento: CAP Puro; SBS; CAP + Óleo de Mamona nos teores de 3%, 5%, 7%, e 9% de adição do óleo.....	76
Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios de viscosidade pelo viscosímetro de Brookfield.	78
Tabela 4.11 - Parâmetros volumétricos obtidos em função dos Teores de CAPs iniciais calculados..	82
Tabela 4.12 – Resultados dos parâmetros da Dosagem Superpave para as misturas com os teores de CAP estimados.	83
Tabela 4.13 - Parâmetros da Dosagem Superpave para a mistura com o teor de CAP de 4,4%.	84
Tabela 4.14 – Resistência à Tração Diametral.	86
Tabela 4.15 - Resultados dos corpos de provas quanto ao ensaio de Lottman Modificado.....	88
Tabela 4.16 – Módulos de Resiliência [Valores Valores Individuais e Médios, respectivamente].	91
Tabela 4.17 – Resumo das propriedades volumétrica e mecânicas das misturas asfálticas estudadas [CAP Puro; CAP + SBS, e CAP + 5% de óleo de Mamona].	93
Tabela 4.18 – Valores da quantidade de óleo BPF para aquecimento do CAP.	94
Tabela 4.19 – Valores da quantidade de óleo BPF para aquecimento dos agregados.....	94
Tabela 4.20 – Valores da quantidade de óleo BPF para Mistura.....	94

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 2-1- Classificação dos Cimentos Asfálticos.....	7
Fluxograma 2-2 – Estrutura de entrada de dados do <i>Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide da AASHTO</i> (2008).....	20
Fluxograma 3-1 – Seqüência de atividades e de ensaios realizados na fase experimental da pesquisa.	46
Fluxograma 3-2 – Seqüência de atividades utilizadas para a dosagem Superpave.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS

$ E^* $	Módulo Complexo em 10^5 psi;
A	Massa do agregado seco, em kg ou g;
AASHTO	American Association Of State Highway And Transportation Officials;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
AMP	Asfaltos Modificados por Polímeros;
ANP	Agência Nacional de Petróleo;
ASTM	American Society for Testing and Material;
ATECEL	Associação Técnico-Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior;
A_v	Abrasão <i>Los Angeles</i> de graduação n, com aproximação 1%;
B	Massa do agregado na condição saturada superfície seca, em kg ou g;
BPF	Baixo Ponto de Fluidez
CA	Concreto Asfáltico;
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo;
CBR	Índice de Suporte Califórnia;
CGS	Compactador Giratório SUPERPAVE;
CPs	Corpos de Prova;
DC	Deformação Controlada;
DEC	Departamento de Engenharia Civil;
DMT	Massa Específica Teórica das Misturas Asfálticas;
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem;
DNIT	Departamento Nacional de Infra estrutura e Transporte;
DOTs	Departamentos de Transportes dos Estados Unidos;
D_T	Creep Compliance
EA	Resultado do ensaio de Equivalente Areia;
f	Frequência de aplicação da carga em Hz;
G_l	Massa específica do CAP (g/cm^3);
G_l	Massa específica do ligante (g/cm^3);

G_{mm}	Massa Específica Máxima Medida;
G_{sb}	Massa específica aparente da composição de agregados (g/cm^3);
G_{se}	Massa específica efetiva da composição de agregado (g/cm^3);
HMA	Hot Mix Asphalt;
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo;
k_b, n^l	Constantes obtidas na regressão linear dos pares N e σ_t (ou $\Delta\sigma$) determinados em ensaios, em escalas logarítmicas.
LA	Los Angeles;
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos;
LUBNOR	Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste;
M'	Massa da amostra lavada e seca, após o ensaio;
M_{ag}	Massa de agregado (g);
ME	Método de Ensaio;
M_n	Massa total da amostra seca, colocada na máquina;
MR	Módulo de Resiliência;
n	Graduação escolhida para ensaio. (A,B,C,D,E,F, ou D);
N	Número de repetições do carregamento necessário à ruptura completa da amostra (vida de fadiga);
NBR	Norma Brasileira Registrada;
P/a	Relação pó asfalto;
$Pa.s$	Pascal segundo;
P_{ag}	Percentual de agregado na mistura (% em massa);
PG	Performance Grade;;;
P_l	Teor de ligante (% em massa);
P_i	Teor de ligante inicial (% em massa);
PU	Resina Poliuretânica;
RBV	Relação Asfalto Vazios;
RRT	Relação da Resistência à Tração;
RT	Resistência à Tração;
SBS	Styrene – Butadiene – Styrene ;

SHRP	Strategic Highway Research Program;
SMA	<i>Stone Mastic Asphalt</i> ;
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavements;
TRB	Transportation Research Board;
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande;
VAM	Vazios do Agregado Mineral;
V_{beff}	Percentual efetivo de asfalto por volume;
V_{la}	Volume de ligante absorvido (%);
V_{le}	Volume de ligante efetivo (%);
VTM	Vazios Na Mistura Total;
VV	Volume De Vazios;
WMA	<i>Warm-mix asphalt</i> ;
ZR	Zona de Restrição;
γ_s	massa específica do agregado seca, em kg/dcm ³ ou em g/cm ³ ;
ϵ_t	Deformação de tração;
η	Viscosidade do asfalto em 10 ⁶ poise;
σ_t	Tensão de Tração;
$\Delta\sigma$	Diferença algébrica entre as tensões horizontal (de tração) e vertical (de compressão) no centro da amostra;
σ_t	Tensão de tração repetida solicitante;

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	3
1.1.1 Geral	3
1.1.2 Específicos	3
1.2 Organização do trabalho	3
CAPÍTULO 2	5
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1 Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP).....	5
2.1.1 Tipos de Cimentos Asfálticos.....	6
2.1.2 Composição Química dos Cimentos Asfálticos.....	8
2.2 Composições de Misturas Asfálticas (Dosagem).....	10
2.2.1 Compactação de Misturas Asfálticas.....	13
2.3 Dosagem Superpave	15
2.4 Propriedades das Misturas Asfálticas	19
2.4.1 Propriedades de Estado de uma Mistura Asfáltica.....	20
2.5 Parâmetros de Misturas Asfálticas Relevantes para a Pavimentação Asfáltica	22
2.5.1 Módulo de Resiliência	22
2.5.2 Ensaio de Vida de Fadiga	27
2.5.3 Ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral.....	31
2.5.4 Ensaio de Lottman.....	33
2.6 Asfaltos Modificados	35
2.7 Misturas Mornas	38
2.8 Óleo de Mamona.....	40
2.8.1 O Uso do óleo de Mamona	41
2.8.2 Extração do Óleo	42
2.8.3 Especificações Técnicas do Óleo de Mamona	42
2.8.4 Cadeia Produtiva.....	43
CAPÍTULO 3	46
3. MATERIAIS E MÉTODOS EMPREGADOS	46
3.1 Seleção dos Materiais	47
3.1.1 Materiais Granulares	47
3.1.2 Cimento Asfáltico de Petróleo	49
3.1.3 Óleo de Mamona.....	49
3.1.4 Laboratórios Utilizados	50

3.2 Estudos das Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais	51
3.2.1 Agregados.....	51
3.2.2 Cimento Asfáltico	55
3.3 Adição do óleo de Mamona ao CAP	58
3.4 Dosagem das Misturas Asfálticas.....	59
3.4.1 Misturas Asfálticas	59
3.5 Estudos das Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas	60
3.5.1 Compactação dos Corpos de Prova	61
3.5.2 Ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral (RT).....	61
3.5.3 Ensaio de Lottman.....	62
3.5.4 Ensaio de Módulo de Resiliência.....	64
CAPÍTULO 4	67
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1 Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais individualizados.....	67
4.1.1 Distribuição dos Tamanhos das Partículas dos Materiais Granulares	67
4.1.2 Ensaio de Equivalente areia	73
4.1.3 Peso Específico Real e Aparente	74
4.1.4 Abrasão Los Angeles e Absorção dos agregados graúdos	74
4.1.5 Ensaio de Penetração e Ponto de Amolecimento	75
4.1.6 Ensaio de Viscosidade Brookfield.....	78
4.2 Dosagem das Misturas Asfálticas.....	81
4.3 Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas.	85
4.3.1 Considerações finais.....	92
CAPÍTULO 5	95
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA AS FUTURAS PESQUISAS.....	95
5.1 Conclusões.....	95
5.2 Sugestões para as futuras pesquisas	96
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

A busca por produtos que sejam eficientes, e causem pouco ou nenhum dano ao ambiente, vem incentivando cada vez mais pesquisas sobre produtos oriundos de fontes renováveis, e cuja exploração gere benefícios à população que os explore.

A utilização de asfalto com agentes modificadores, como os polímeros, aditivos e rejeitos industriais pode resultar na redução de custos na manutenção do pavimento, na diminuição no consumo de energia e ainda na redução da poluição ambiental. Os impactos decorrentes da utilização de cimentos asfálticos modificados poderão gerar alguns benefícios: i) sociais, com a geração de empregos diretos e indiretos; ii) econômicos, com a diminuição de gastos com matéria-prima, na manutenção de estradas e rodovias, redução no consumo de energia e na importação de barris de petróleo; iii) ambientais, a partir do reaproveitamento da borracha de pneus descartados no meio ambiente, bem como a diminuição dos voláteis liberados durante a pavimentação (MOTHÉ, 2009).

No Brasil, os estudos e aplicações destes tipos de tecnologias “verdes” iniciaram-se junto aos institutos de pesquisas, onde são desenvolvidas, em sua maioria, nos laboratórios com novas tecnologias e com fins acadêmicos. A adição de *Zeólitas* é um assunto dos mais comentados nos últimos anos, logo há a importância de intensificar as pesquisas na área de misturas mornas, para se identificar quais seriam as técnicas ou produtos mais convenientes para o País. A Rodovia dos Bandeirantes, no estado de São Paulo, contém trechos experimentais com tipos de tecnologias diversas, como é o caso do asfalto borracha e de misturas mornas, mas com âmbitos totalmente ambientais.

A redução das temperaturas de produção e aplicação das misturas betuminosas proporciona benefícios de sustentabilidade evidentes a curto, médio e longo prazo, possíveis de agrupar em vantagens sociais, econômicas e ambientais (NYNAS, 2009).

Os revestimentos asfálticos são constituídos de materiais tais como: agregados de tamanhos e de proporções, mantidos unidos por um “*aglomerante*” denominado Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Seu nível de desempenho será tanto melhor quanto maior for sua interação com seus constituintes sob diferentes condições de carregamento, de estruturas e de

variações sazonais do clima. Cerca de noventa por cento (90%) dos cem milhões de toneladas anuais de cimentos asfálticos são aplicadas na indústria de pavimentação, que misturados aos agregados minerais formam as misturas asfálticas (MOTHÉ, 2009).

Estatísticas publicadas no Anuário Estatístico de Transportes Terrestres (AETT) do Ministério dos Transportes, tendo como fonte o DENATRAN de 2010, mostram forte crescimento da frota de veículos no país, o que vem exigindo cada vez mais do pavimento rodoviário. Esta tendência, aliada a serviços de pavimentação mal executados e a projetos inadequados, utilizando critérios obsoletos que não englobam todas as variáveis, favorece o surgimento de defeitos, como os causados por fadiga e deformação permanente da massa asfáltica.

Para evitar a ocorrência prematura desses defeitos, uma das opções, além dos estudos de critérios de dosagem, é a introdução no mercado de vários tipos de aditivos para cimentos asfálticos e misturas asfálticas. A importância dos movimentos ambientais e a busca da sustentabilidade, associada ao desenvolvimento de tecnologias que buscam uma maior eficiência energética e segurança para seus usuários, tem conduzido o surgimento de novos produtos e processos que permitam diminuir a temperatura de usinagem e de compactação. Como prova da busca destes novos produtos temos o *Warm-mixasphalt* (WMA), e o *Asphaltan B* (produto norte Americano que utiliza a cera da Mamona como aditivo), conhecidos no Brasil como misturas mornas, que se inserem, neste contexto, no mercado internacional.

As misturas asfálticas modificadas são o produto da adição do cimento asfáltico ao agregado e, eventualmente, com modificadores para lhes conferir propriedades diferenciadas, ou melhores, em relação à mistura convencional. Esta modificação busca melhorar as propriedades viscoelásticas destes materiais, reduzindo, também, custos com manutenção e execução, e promovendo uma maior vida útil das misturas (LIMA et al. 2008).

O óleo de Mamona é oriundo de fonte renovável e biodegradável e pode ser utilizado como “aditivo verde”. Por suas características antioxidantes e suas propriedades tensoativas, mostra-se promissor para reduzir a elevada viscosidade dos ligantes e ligantes modificados por polímeros, reduzindo gastos na usina, além de aumentar a estabilidade à estocagem e a adesividade nas misturas com os agregados. Nesse contexto, o óleo da Mamona mostra-se potencialmente útil para ser empregado como aditivo na melhoria das propriedades dos cimentos asfálticos.

É exatamente na variável “CAP” que é focada a presente pesquisa. Utilizando-se do método de dosagem Superpave (Compactador Giratório Superpave), o comportamento mecânico de misturas modificadas com teores do óleo de Mamona são comparados à misturas convencionais, utilizando-se o mesmo ligante CAP 50/70 fornecido pela empresa LUBNOR, que, de forma adequada, deve conferir uma melhor interação com os agregados minerais, comprovando assim um comportamento estimado nas suas propriedades de estado e mecânicas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Este trabalho tem por objetivo verificar o comportamento mecânico de misturas asfálticas dosadas segundo a metodologia SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavements*), com a utilização de CAPs modificados à base de óleo da Mamona.

1.1.2 Específicos

Procurar-se-á verificar a eficiência energética desta mistura, de forma a contribuir com uma melhor estabilidade, tempo para estocagem e diminuição das temperaturas de usinagem e de compactação, a partir da comparação das propriedades mecânicas para teores diversos de óleo de Mamona.

A avaliação das propriedades mecânicas será analisada a partir da realização dos ensaios de Resistência à Tração, Módulo de Resiliência e Lottman Modificado.

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 ao Cimento Asfáltico de Petróleo, asfaltos modificados, caracterização física e reológica dos ligantes, pavimento, a Mamona, misturas asfálticas, propriedades das misturas asfálticas,

dosagens de misturas asfálticas e parâmetros de misturas asfálticas relevantes para pavimentação.

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

[Capítulo 4] Resultados – os dados 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 referentes 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 inseridos as planilhas, os gráficos e os quadros resultantes do processamento de dados.

CAPÍTULO 2

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP)

O registro mais antigo do uso do asfalto pelo homem é de 180.000 anos atrás em *El Kowm Basin* na Síria, no qual o asfalto natural era utilizado para grudar/unir utensílios a pedras e ferramentas para gerar faísca e, conseqüentemente, para controlar o fogo (LESUEUR, 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).

Na América Latina, as estradas mais antigas foram construídas pelos Incas de 1438 a 1532, sempre acima do nível dos rios de forma a evitar as inundações. As obras de engenharia dos incas continuam até hoje impressionando a civilização pelo seu valor imensurável. Outro registro da manipulação do asfalto é datado 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).

No ano 1790, em Portugal, as estradas passaram a ser construídas com minas, saibro, tufo, areia e terras calcárias. 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, ligando 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 macadame¹ como base de revestimento, substituindo as pedras importadas de Portugal.

Três fatos foram cruciais para o avanço do setor rodoviário brasileiro e da pavimentação em 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. Destacam-se a partir daí grandes projetos rodoviários no setor de transportes e estradas, como a Rodovia Transamazônica e a Ponte Rio/Niterói entre os anos de 1960 e 1980.

No ano de 2008 foram comercializadas no Brasil 2.168.922 toneladas e exportadas 22.138 toneladas de asfaltos pela Petrobrás. Em 2008, a LUBNOR, refinaria de petróleo da Petrobrás, localizada em Fortaleza-CE, registrou com as vendas de asfaltos (CAP e ADPs) a comercialização de 218.508 toneladas. O recorde anterior foi no 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). Em 2009, a LUBNOR conquistou o recorde histórico anual de vendas de asfaltos, alcançando a marca de 242.904 toneladas vendidas. Esse recorde representa um incremento nas vendas de onze por cento (11%) em relação ao ano anterior e mais de quarenta e nove por cento (49%) quando comparado a média dos últimos quinze anos.

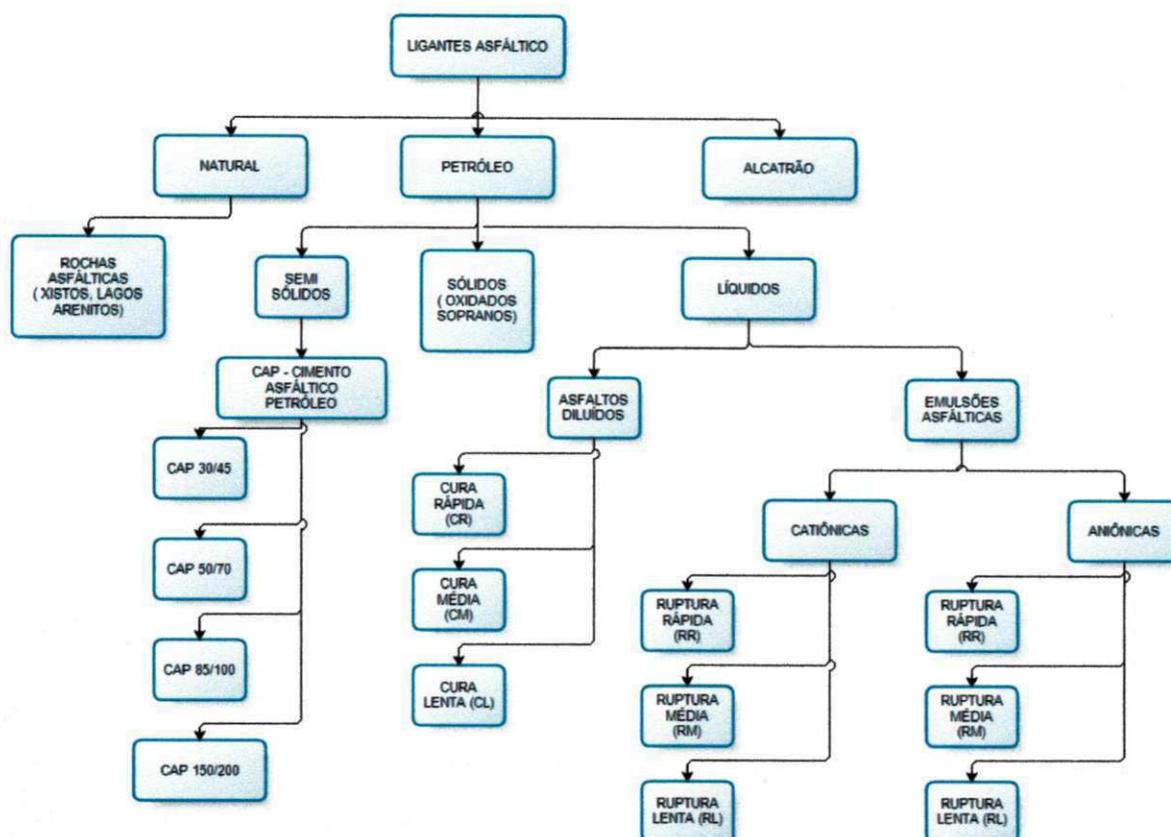
2.1.1 Tipos de Cimentos Asfálticos

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, quase com um comportamento de 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. No Fluxograma 2.1, observa-se as divisões e subdivisões destes aglutinantes:

¹ 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.

Fluxograma 2-1- Classificação dos Cimentos Asfálticos



Fonte: Autoria própria

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*, nos relatos de suas viagens mencionou a existência de um lago de asfalto natural na *Ilha de Trinidad*, 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). Na figura 2.1, têm-se exemplos de lagos naturais de Petróleo.

Figura 2-1 - Asfalto natural na ilha de Trinidad.



(a)

(b)

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 vez que este possui muitos compostos carcinogênicos. Uma das utilizações remanescentes de alcatrão na pavimentação foi como selante, pois este material é insolúvel em derivados do petróleo (DNIT, 1996; IBP, 1999).

2.1.2 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 noventa (90) a noventa e cinco por cento (95%) de hidrocarbonetos e de cinco (5) a dez por cento (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 estas, por sua vez, são determinadas pela 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 técnico 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.*

Portanto, a importância de estudos sobre a composição química de cimentos asfálticos está diretamente relacionada ao desenvolvimento da compreensão de quais de seus

constituintes são essenciais para a produção de misturas asfálticas com as propriedades de estado, físicas e mecânicas mais adequadas à pavimentação, levando-se em consideração o custo de produção. Com isso, estas informações podem ser usadas para a seleção e/ou modificações de CAPs que atendam as exigências crescentes do desempenho mecânico sob ação do tráfego de veículos e das condições do meio ambientes locais.

2.2 Composições de Misturas Asfálticas (Dosagem)

Conforme o Manual de Asfalto (1989), o Concreto Asfáltico (CA) é um tipo de mistura asfáltica que deve satisfazer aos requisitos relacionados à densidade aparente e a homogeneidade, que, por sua vez, são inerentes as 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. Os principais mecanismos de deterioração apresentados pelos pavimentos flexíveis são inerentes 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 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 na trafegação de caminhões com maiores cargas por eixo e, principalmente, com pressões de

enchimento dos pneus muito acima dos quinhentos e cinquenta (550) kPa (75 psi), valor de referência do AASHTO Road Test.

Com o objetivo de obter a qualidade e as propriedades adequadas para o projeto de misturas asfálticas é prudente escolher os materiais de forma proporcional, 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. Este, por sua vez, tem uma estimativa complexa. Acredita-se que esse termo tenha sido escolhido por analogia ao teor ótimo de umidade de um solo, pela 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 de estudos das propriedades de estado da mistura asfáltica com uma composição preestabelecida (volumetria), 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 misturas betuminosas, a “Marshall”, foi desenvolvida 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 cimento 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 cimento 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, na indução da presença de água etc.).

No procedimento de dosagem de misturas asfálticas desenvolvido no programa SHRP são avaliados amplas faixas de temperaturas 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 mesmo será construído.

2.2.1 Compactação de Misturas Asfálticas

O método de dosagem mais utilizado em nível mundial faz uso de compactação da mistura asfáltica por impacto (golpes), sendo denominado de Método Marshall, em referência ao engenheiro Bruce Marshall, que deu origem ao desenvolvimento desse procedimento na década de 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 ter como objetivo a similitude com as condições de campo as quais são impostas pelas cargas provenientes dos veículos 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.

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 concreto asfáltico. 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.

Segundo os autores, 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;
- 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 cimento de asfalto 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 (HMA – Hot Mix Asphalt). 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 as torna menos susceptíveis aos desgastes e as patologias prematuras do revestimento Asfáltico. A compactação de misturas asfálticas por amassamento em substituição a procedimento Marshall (por impacto) é sugerida por vários estudiosos do assunto, como Cross (1999) e Lee et al. (2001).

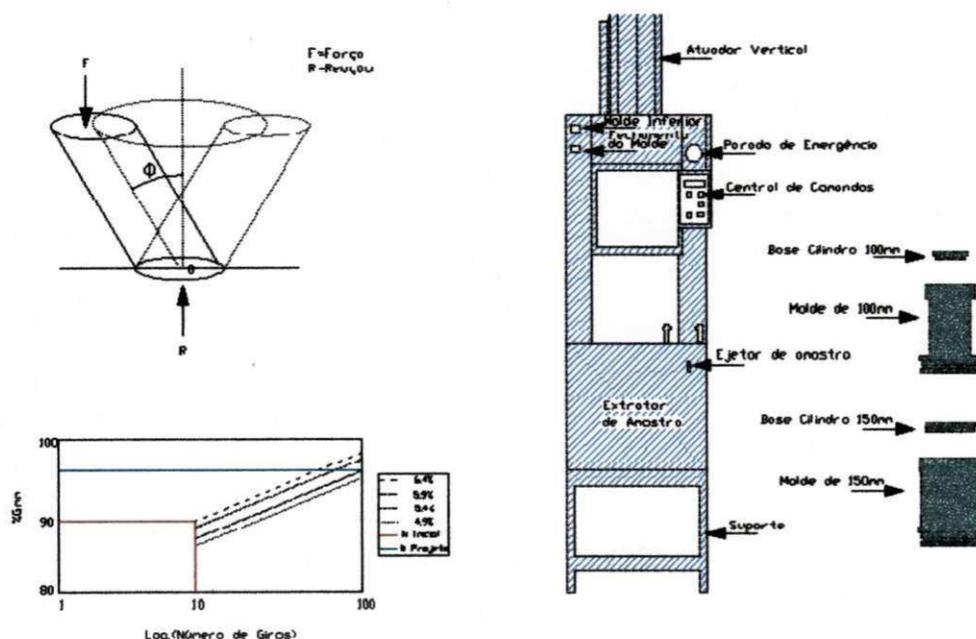
Brian J. C. e Kera Vanderhorst (1998) corroboram afirmando que o procedimento de dosagem SUPERPAVE foi desenvolvido para simular, na forma mais realística possível, as condições de estado (volumetria) obtidas sob condições de carregamento e temperatura que ocorrem em campo.

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 sob tráfego, o *Superpave Gyratory Compactor* (SGC) com uma redistribuição das partículas de agregados semelhante ao que ocorre em campo. Este 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 2.2).

Figura 2.2 Layout da forma de compactação e da estrutura do Compactador Giratório Superpave (CGS)

Fonte: SILVA, 2011



2.3 Dosagem Superpave

O procedimento de Dosagem Superpave utiliza um conjunto de procedimentos, especificações e seleção de agregados. Embora nenhum novo ensaio de agregados tenha sido

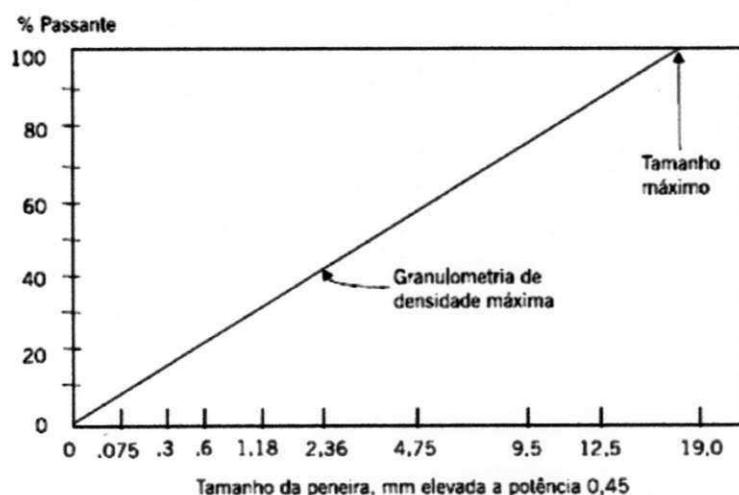
desenvolvido, métodos atuais de seleção e especificação foram aperfeiçoados e incorporados ao método. Estes, por sua vez, incluem os conceitos de ponto de controle e zona de restrição. O consenso do grupo de especialistas é que a forma e a angularidade dos agregados graúdo e miúdo são críticas e devem ser avaliadas com o objetivo de verificar a adequação dos agregados quanto a sua influência no comportamento mecânico da mistura. Já a composição a ser utilizada deve estar dentro dos pontos de controle, sendo abaixo ou acima da zona de restrição e não coincidir com a curva de densidade máxima na “Curva de Fuller” (Figura 2.3).

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 dez por cento (10%).

A curva de densidade máxima representa a distribuição dos tamanhos de partículas onde os agregados se encaixam da forma mais compacta possível. Esta, por sua vez, deve ser evitada para que o espaço entre os agregados não se torne excessivamente pequeno e assim permitir a inserção de um filme resistente ao asfalto.

Figura 2-3 - 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 2.1 e Tabela 2.2). 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 2.1 Pontos de controle de acordo com o tamanho máximo do agregado (SUPERPAVE)

Abertura (mm)	Pontos de Controle									
	Percentagem 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

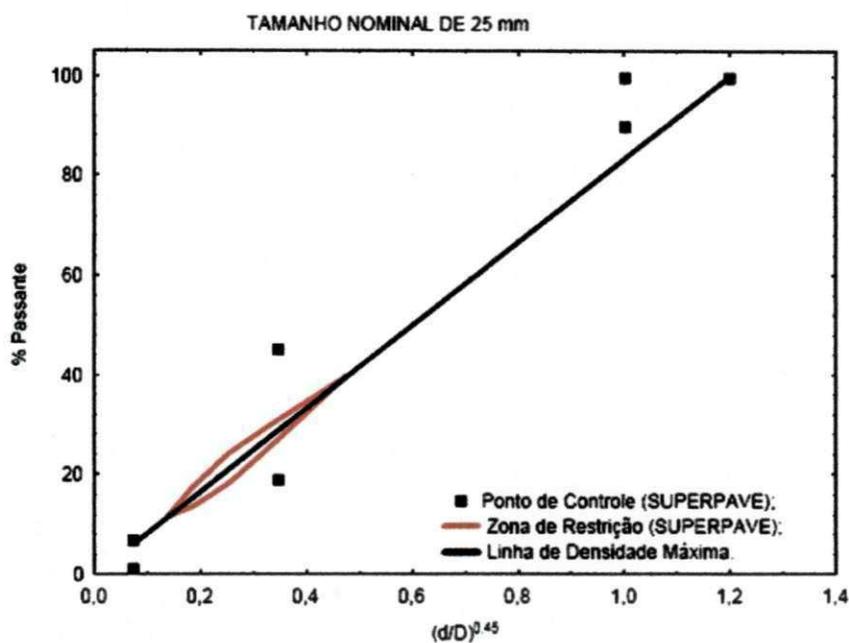
Tabela 2.2 Zona de restrição de acordo com o tamanho máximo do agregado (SUPERPAVE)

Abertura (mm)	Zona de Restrição SUPERPAVE									
	Percentagem 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	18,10	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 2.4). As curvas que cruzam a zona de restrição são chamadas de “*granulometria corcunda*” devido à geometria característica na curva que indica a presença de excesso de areia fina. Esta, por sua vez, apresenta comportamento frágil dificultando a compactação da mistura e tornando-a susceptível 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 2-4 Curva de Fuller & Thompson para representação da distribuição dos tamanhos das partículas de agregados para misturas asfálticas (Tamanho Nominal 25 mm: Traduzido de ROBERT et al. 1996)



Os parâmetros volumétricos e as propriedades dos materiais constituintes da mistura asfálticas 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. A Tabela 2.3 apresenta os requisitos VAM preconizados pelo procedimento Superpave.

Tabela 2.3 – Recomendação Superpave para vazios de agregado mineral

Tamanho Nominal Máximo do Agregado	VAM mínimo (%)
9,5 mm	15,0
12,5 mm	14,0
19 mm	13,0
25 mm	12,0
37,5 mm	11,0

Outro importante requisito de mistura é a relação pó/asfalto. 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 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.

2.4 Propriedades das Misturas Asfálticas

O conhecimento adequado das propriedades de estado, físicas e mecânicas de misturas asfálticas podem 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 & Motta (2005), a tendência mundial é o estabelecimento de métodos de dimensionamento mecanísticos tanto para pavimentos flexíveis e como para os rígidos, novos e/ou restaurados. Entretanto, no dimensionamento de um pavimento por um método mecanístico devem ser considerados parâmetros de entrada que representem e/ou que estejam relacionados à rigidez dos materiais constituintes da estrutura do pavimento, à influência do meio ambiente, e ao 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.

A AASHTO (2008) em seu Manual de Prática – *Mechanistic - Empirical Pavement Design Guide*, traz na sua última edição um procedimento que vem sendo estudado há mais de dez (10) anos para ser utilizado no projeto de dimensionamento de novos pavimentos rígidos e flexíveis, contemplando ao mesmo tempo os projetos de restauração para estes pavimentos e que corrobora com o que foi descrito no parágrafo anterior.

Dessa forma, o estudo das propriedades supracitadas dos materiais que constituem as camadas do pavimento e, em especial, das misturas asfálticas é indispensável para que o revestimento de pavimentos flexíveis tenha uma serventia adequada ao longo da sua vida de serviço. Neste contexto, os ensaios com aplicação de cargas repetidas e estáticas, bem como a forma de compactação dos concretos asfálticos, os quais procuram simular as condições reais de condicionamento, de tensão e de deformação sob ação do tráfego, constituem ferramentas apropriadas para o conhecimento adequado dos *Módulos de Resiliência* (M_R), *Creep Compliance* (D_T), entre outros parâmetros que têm relação direta com a eficácia estrutural do revestimento (Fluxograma 2.2).

Fluxograma 2-2 Estrutura de entrada de dados do *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide da AASHTO* (2008)

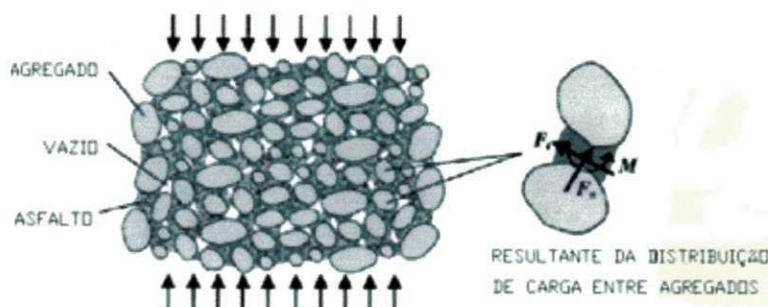


2.4.1 Propriedades de Estado de uma Mistura Asfáltica

Os principais componentes das misturas asfálticas definem a partir das proporções relativas de suas propriedades o desempenho dos pavimentos (Figura 2.5). Os agregados que constituem a mistura asfáltica precisam apresentar intertravamentos pelo quais são obtidos através dos agregados angulares ou os 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 2-5 - Ilustração dos componentes das misturas asfálticas que definem suas proporções relativas



O bom desempenho de um Concreto Asfáltico está também relacionado à resistência ao cisalhamento do agregado. Quando aplicada uma carga sobre uma massa de agregados, ela poderá começar a deslizar uma em relação à outra, 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, os procedimentos *Marshall* e *Hveem* predominaram entre os anos de 1940 a meados de 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 adéquam, por exemplo, para misturas com diâmetro máximo do agregado maior que 25 mm.

Dentre os parâmetros mais utilizados destacamos o volume de vazios (VV), 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 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 (D 2041 da ASTM).

Segundo Roberts et al. (1996), muitos estados americanos apontam 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.

2.5 Parâmetros de Misturas Asfálticas Relevantes para a Pavimentação Asfáltica

2.5.1 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 & 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 *Hveem* 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.

*Papazian*², em 1962, foi um dos primeiros a realizar e descrever os ensaios de desempenho viscoelásticos sobre misturas asfálticas. Segundo os autores, em seus estudos foram aplicadas e mensuradas, sobre corpos de prova cilíndricos, as tensões e as deformações, seguindo uma frequência senoidal. Estes, por sua vez, foram conduzidos em condições de temperatura e com variações de cargas de amplitudes controladas. Em seu trabalho *Papazian* concluiu que os conceitos de viscoelasticidade poderiam ser aplicados em projetos de dimensionamento e de avaliação do desempenho de pavimentos flexíveis. (PAPAZIAN apud CLYNE et al. 2003)

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 200 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”.

Diferentes métodos de ensaios e equipamentos têm sido desenvolvidos e empregados para obtenção de diferentes módulos de misturas asfálticas. Podemos citar o ensaio “triaxial” (com aplicação de carregamento constante e cíclico), o ensaio de flexão cíclica, o ensaio de tração indireta, e o ensaio de *Creep* dinâmico com aplicação de carga repetida. *Baladi e Harichandran* sugerem que o Módulo de Resiliência (M_R) de misturas asfálticas obtidos com o auxílio do ensaio com corpos de prova submetidos a tração indireta por compressão diametral é mais promissor em termos de repetibilidade (BROWN et al.1989).

O ensaio empregado para determinação do M_R de misturas asfálticas aplicando-se os carregamentos repetidos (Ciclo e frequência pré-determinados) no plano diametral de um corpo de prova cilíndrico de dimensões padronizadas (Tração Indireta) é executado com a aplicação do carregamento de forma a gerar uma tensão de tração transversal ao plano de

² PAPAZIAN, H.S., *The response of linear viscoelastic materials in the frequency domain with emphasis on asphaltic concrete*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENTS, 1., 1962, Michigan, USA. Proceedings. p. 454-63.

aplicação da carga, o que provoca o deslocamento diametral “recuperável” na direção horizontal, correspondente à tensão gerada, sob uma determinada temperatura (T) (Figura 2.6).

Estudos indicam que existem diferenças significativas entre os valores mensurados dos Módulos Dinâmicos (Módulo de Resiliência na Compressão) sob diferentes tipos de carregamento (com confinamento e sem confinamento). Estes, por sua vez, afetam especialmente o ângulo de fase e tendem a ser mais significativos sob altas temperaturas. Witczak & Root (1974) e Khanal & Mamlouk (1995) inferem que os ensaios em corpos de prova cilíndricos por compressão podem ser mais representativos das condições em que as misturas asfálticas estão submetidas em campo (Figura 2.6).

Figura 2-6 “Layout” do procedimento para a realização do ensaio de Módulo de Resiliência em corpos de prova submetidos à tração indireta por compressão diametral (Fonte: SILVA, 2011)

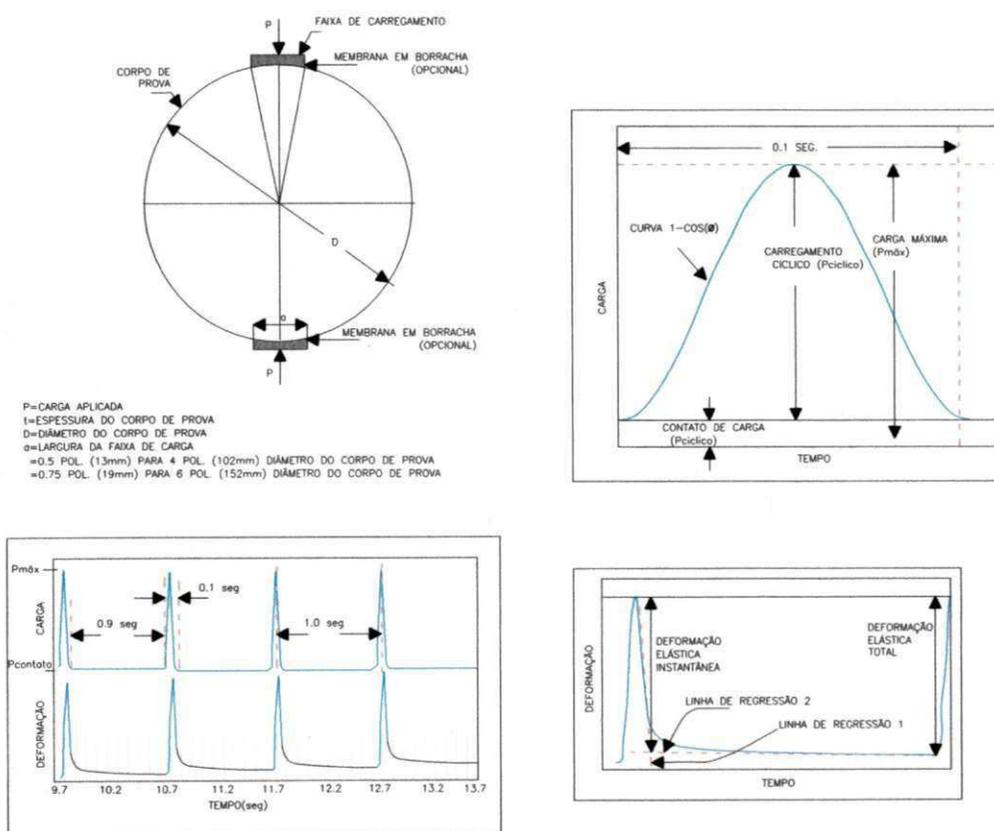
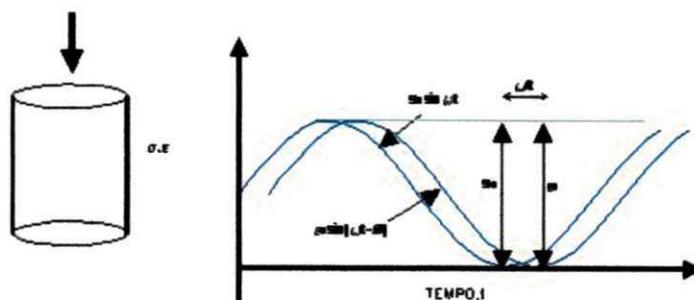


Figura 2-7 Layout do procedimento para realização do ensaio de Módulo Dinâmico (E^*) sob carregamento de tensão na compressão
(Fonte: SILVA, 2011)

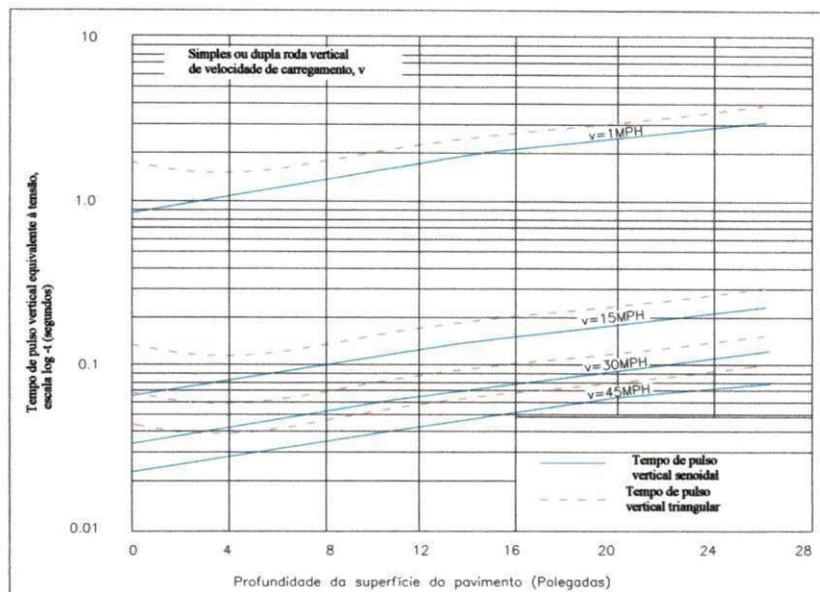


As misturas asfálticas, por herdarem a viscoelasticidade apresentada pelo CAP, possuem níveis de deformações dependentes do tempo de ação da carga e da temperatura. Assim, quanto mais rápida a aplicação das cargas, menor a deformação resultante medida e maior o Módulo de Resiliência mensurado. Este fenômeno 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 (Figura 2.8).

Segundo Marques (2001), os módulos de resiliência de misturas asfálticas podem variar segundo:

- tipo de mistura asfáltica;
- tipo de asfalto;
- distribuição dos tamanhos das partículas dos agregados da mistura;
- frequência do carregamento;
- energia e processo de compactação;
- temperatura.

Figura 2-8 Tensão equivalente vertical versus profundidade da camada
(Adaptado de MEPDG – AASHTO, 2008)



O Modelo de *Witczak* constante abaixo constitui uma prova concreta dos principais atores que exercem influências preponderantes sobre o comportamento mecânico de misturas asfálticas mensurado pelo Módulo Dinâmico (E^*) (Figura 2.9).

Figura 2-9 Modelo de previsão Witczak do Módulo Dinâmico para Misturas Asfáltica
(CLYNE et al., 2003)

$$\log |E^*| = -0.261 + 0.008225 P_{200} - 0.00000101 (P_{200})^2 + 0.00196 P_4 - 0.03157 V_a - 0.415 \frac{V_{beff}}{(V_{beff} + V_a)} + \frac{1.87 + 0.002808 P_4 + 0.00000404 P_{38} - 0.0001786 (P_{38})^2 + 0.0164 P_{34}}{1 + e^{(-0.716 \log f - 0.7425 \log \eta)}}$$

Onde:

$|E^*|$ = Módulo Complexo em 10^5 psi;

η = Viscosidade do asfalto em 10^6 poise;

f = Frequência de aplicação da carga em Hz;

V_v = percentual de vazios na mistura por volume;

V_{beff} = percentual efetivo de asfalto por volume;

P_{34} = percentual retida no diâmetro 3/4", por peso total de agregado acumulado;

P_{38} = percentual retida no diâmetro 3/8", por peso total de agregado acumulado;

P_4 = percentual retida na peneira de N^o 4, por peso total de agregado acumulado;

P_{200} = percentual que passa na peneira de N^o 200, por peso total de agregado.

2.5.2 Ensaio de Vida de Fadiga

Fadiga é definida pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 1979) 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".

Segundo Bernucci (2007), as cargas cíclicas produzem danos intermitentes, ou seja, na fase de carregamento o dano cresce, enquanto a fase de descarregamento o dano mantém-se constante. Estas cargas produzem falhas nos materiais para valores de tensão mais baixos do que aqueles obtidos na ruptura em ensaios estáticos, porém a mesma carga é aplicada diversas vezes. Esse fenômeno é chamado fadiga. Vale salientar que esse é um problema não-linear que ocorre em diversos materiais, ou seja, o dano produzido no primeiro ciclo é diferente do dano produzido no segundo ciclo e assim sucessivamente.

A determinação da vida de fadiga das misturas asfálticas é feita a partir de ensaios de laboratório ou de campo e a sua resistência a 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 (ϵ_t) ou da tensão de tração (σ_t) necessária para levar o material à ruptura.

São inúmeros os fatores que afetam a vida de fadiga de uma mistura asfáltica. Em Pinto & Motta (1995) foi relacionado os fatores que mais afetam a vida de fadiga das misturas, destacando a temperatura como o principal, da seguinte forma:

- Fatores de carga: magnitude do carregamento, tipo do carregamento (tensão ou deformação controlada), frequência, duração e intervalo de tempo entre carregamentos e outros;

- Fatores da mistura: tipo, forma e textura do agregado, penetração do asfalto, teor do asfalto, relação filer-asfalto, temperatura da mistura e vazios.

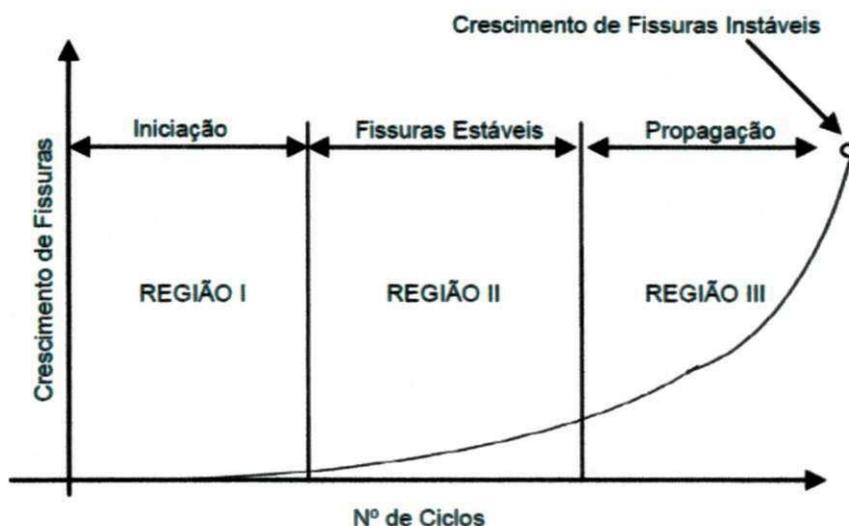
A fadiga ocorre por meio de ações mecânicas e/ou térmicas que não parecem críticas por si se comparadas à resistência sob carregamento monotônico, mas na verdade são

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 2.10.

- Região I: onde as primeiras mudanças micro estruturais 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 2-10 Estágios existentes em um processo de fadiga

(Fonte: BERNUCCI et al. 2007)



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

No decorrer do ensaio de fadiga, a deformação de 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 a 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 cinco 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 nos 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 a 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 10 Hz, 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 (>25 Hz). 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 (10 – 15 Hz), com a amostra submetida a um estado de tensões biaxial, 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 apresentaram 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 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 (Equação 1; Equação 2) para três misturas com distintas faixas granulométricas, como são demonstradas na Figura 2.11:

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

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

Onde:

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

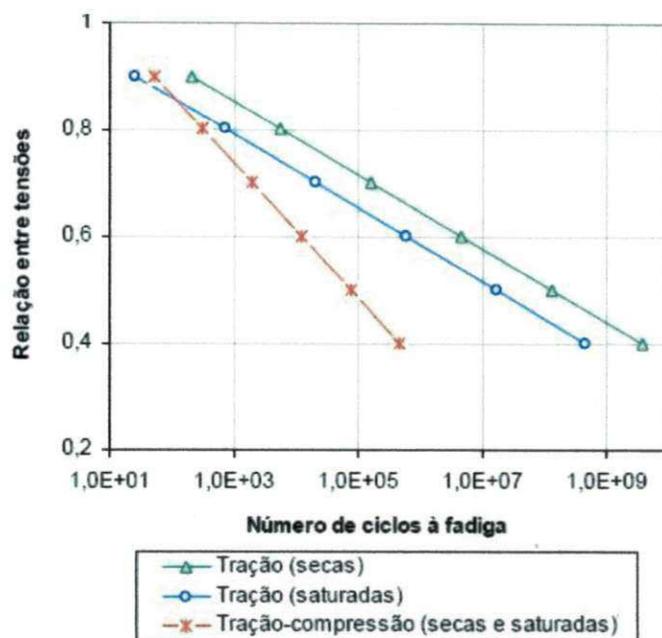
σ_t = tensão de tração repetida solicitante;

$\Delta\sigma$ = diferença algébrica entre as tensões horizontal (de tração) e vertical (de compressão) no centro da amostra (Figura 2.11);

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

Figura 2-11 - 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).

2.5.3 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, tem sido usado no Brasil para o dimensionamento empírico de pavimentos.

No ensaio de resistência a 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. Sendo o corpo de prova apoiado ao longo de duas geratrizes por dois frisos de carga posicionados na parte

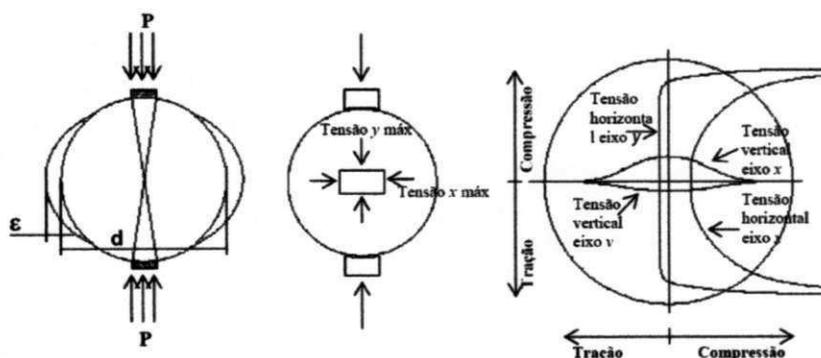
superior e inferior do corpo de prova. Em misturas asfálticas, realiza-se o ensaio de acordo com a norma ME 138/94 do DNIT (Figura 2.12).

Falcão & Soares (2002)³ 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. (FALCÃO & SOARES, 2002 apud LIMA, 2003)

Bernucci et al. (2007) descrevem que com o envelhecimento das misturas asfálticas, o valor da resistência a tração aumenta, todavia, este fator pode vir a comprometer a flexibilidade do revestimento ocasionado pelo aumento do Módulo de Resiliência (M_R).

Figura 2-12 – Layout do estado de tensões gerado no ensaio de tração por compressão diametral

(Fonte: ROHDE 2007)



³ FALCÃO, M.F.B. e SOARES, J.B., **Discussão Sobre os Modos de Ruptura Observados no Ensaio de Compressão Diametral**. In XVI Encontro de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás- IBP. Rio de Janeiro, 2002.

2.5.4 Ensaio de Lottman

O ensaio de Lottman, também conhecido como ensaio de “dano por umidade induzida”, é utilizado para avaliar a capacidade 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*) e CPA (*Camada Porosa de Atrito*), para as quais o ensaio *Lottman* faz parte do projeto (AASHTO, 2001 e WATSON et al. apud MAGALHÃES, 2004). O ensaio é utilizado por engenheiros e técnicos dos Departamentos de Transportes dos Estados Unidos (Department of Transportation-DOTs) e pelo meio acadêmico brasileiro.

De acordo com Furlan (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.

Para Hicks (1991)⁴, o dano por umidade induzida nos pavimentos de concreto asfálticos pode estar associado a dois mecanismos comuns, adesão e/ou coesão. No mecanismo de adesão, geralmente, a água fica entre a película do cimento Asfáltico e o agregado, visto que a superfície do agregado tem maior afinidade pela água do que o asfalto. Desta forma, a água fica entre a película asfáltica e o agregado, rompendo o vínculo adesivo entre eles e deixando o agregado sem proteção.

A perda de contato pode ser visualizada em termos de desligamento ou redução do ângulo de contato entre o asfalto e a superfície do agregado e esse mecanismo depende de fatores, como: temperatura, viscosidade e composição do asfalto, tipo de agregado e espessura da película asfáltica. No segundo mecanismo, a interação da água com o cimento Asfáltico causa uma redução na coesão dentro deste (cimento Asfáltico), com uma séria diminuição na

⁴ HICKS, R. G., *Moisture damage in asphalt concret*. TRB – *Transportation Research Board*, 1991.

integridade e resistência da mistura. Hicks (1991) enumera quatro fatores que influenciam o dano por umidade, a saber:

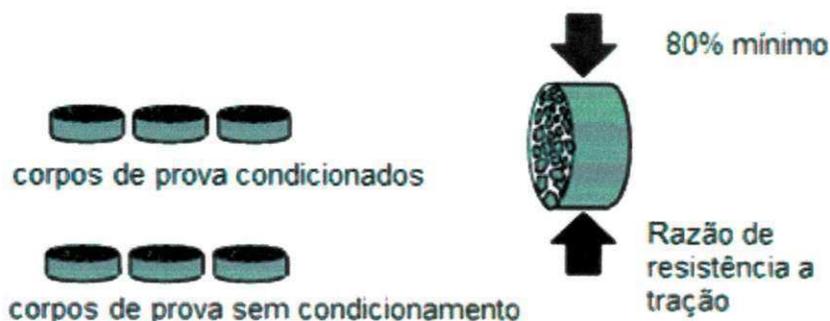
- ✓ as características do concreto Asfáltico, abrangendo o agregado (textura superficial, porosidade, composição mineralógica, composição química da superfície, umidade superficial e recobrimento), o cimento Asfáltico e o tipo de mistura;
- ✓ as condições climáticas (temperatura, vento, umidade), durante 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 deslocamento 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* os corpos de prova são divididos em dois grupos, onde um é rompido à tração (sem condicionamento) e o outro sofre a ruptura após ciclos de gelo e degelo (com condicionamento). A razão entre os grupos fornece a Relação da Resistência à Tração (RRT). A metodologia desenvolvida pelo projeto SUPERPAVE estabelece que este valor deve ficar acima de oitenta por cento (80%), enquanto a MP 8-01 da ASSHTO estabelece o limite mínimo para RRT de setenta por cento (70%). A Figura 2.13 apresenta o esquema simplificado do procedimento para realização do ensaio.

Figura 2-13 Layout do procedimento para o ensaio de Lottman

(Fonte: TANDON et al. 2003)



2.6 Asfaltos Modificados

O crescente poder destrutivo do tráfego nas estradas aliado a crise do petróleo na década de 70 foram os principais fatores no desenvolvimento de asfaltos modificados. A necessidade da redução dos custos de construção e de manutenção levou a busca de soluções inovadoras, em particular para a manutenção de capas de rolamento delgadas de elevada durabilidade, tendo seu uso comercial se difundido nos anos 80.

Aplicações práticas de asfaltos modificados se iniciaram em 1901, quando a *Société du Pavage em Asphalt Caoutchoute* foi estabelecida na França. A primeira estrada construída com asfalto modificado por borracha ocorreu em 1902, em Cannes. Os asfaltos modificados antes da Segunda Guerra Mundial eram constituídos pela adição de borracha natural, que era o material disponível na época. O principal objetivo de combinar asfalto com polímeros é inibir a formação de trincas por fadiga e prolongar a vida útil dos pavimentos, além de aumentar a resistência ao acúmulo de deformação permanente a altas temperaturas e a formação de trincas por origem térmicas quando de submetidos à baixas temperaturas (ZANZOTTO E KENNEPOHL, 1996, apud ODA, 2000).

Segundo ODA (2000) a mistura de materiais betuminosos com a adição de polímeros, visando melhorar as características do ligante asfáltico, não é recente. A primeira patente da combinação da borracha natural com asfalto, a ser utilizada como impermeabilizante, foi obtida por T. Hancock em 1823. Já a primeira patente de uma mistura de material betuminoso

com borracha natural para a construção de estradas foi obtida por E.E. CASTELL em 1844 (ZANZOTTO e KENNEPOHL, 1996).

O uso de modificadores para melhorar as propriedades de um CAP em misturas asfálticas tem aumentado a cada ano. Os modificadores são adicionados visando melhorar o desempenho dos pavimentos, aumentando a resistência ao acúmulo de deformação permanente e ao aparecimento de trincas por fadiga e de contração térmica, retardando o envelhecimento do material e melhorando a adesividade (LING et al.1997).

Os asfaltos modificados podem ser classificados em: *Asfaltos Modificados por Polímeros*, *por Agentes de Rejuvenescimento* e *por Produtos Naturais*. Os *Asfaltos Modificados por Polímeros* (AMP) são asfaltos cujas propriedades tenham sido modificadas pelo uso de agentes químicos que alteram sua estrutura química e/o suas propriedades físicas e mecânicas. Estes CAPs são produzidos em dispersores distantes do canteiro ou por unidades móveis imediatamente antes da mistura na usina de Concreto Asfáltico (AIPCR, 1999). O uso de asfaltos modificados por polímeros no Brasil teve seu início em meados dos anos 90 (AIPCR, 1999).

Os *Agentes Rejuvenescedores* são utilizados na reciclagem de revestimento de forma a reduzir a viscosidade e de reposição dos compostos aromáticos do Cimento envelhecido, restabelecendo assim, as características químicas e físicas. Esses agentes são denominados, segundo o Regulamento técnico DNC nº 04/97, de aditivos asfálticos de reciclagem para mistura à quente (IBP, 1999).

Os *Asfaltos Modificados por Produtos Naturais* são produtos que recebem a adição de elementos naturais como fibras de biomassa, lodos, asfalto natural e enxofre ao cimento asfáltico de petróleo de forma a melhorar algumas das suas propriedades mecânicas. No entanto, estes Cimentos têm sido pouco utilizados na pavimentação em função do alto desempenho dos asfaltos modificados por polímeros bastante difundidos no Brasil (Instituto Brasileiro do Petróleo: IBP, 1999).

Para a escolha do tipo e do teor de polímero são considerados fatores de caráter econômico bem como a viabilidade da incorporação do polímero ao asfalto, dos equipamentos disponíveis para a composição da mistura, da composição química do cimento asfáltico, das viscosidades em função das temperaturas de usinagem e de compactação e da estabilidade à estocagem.

Bahia et al. (1998, apud ODA 2000) destacam que os principais tipos de modificadores utilizados em materiais asfálticos são os polímeros (SBR, SBS e EVA) e a borracha de pneus descartados moída (Tabela 2.4).

Os asfaltos modificados por SBS (*Styrene Butadiene Styrene*) apresentam alta viscosidade a altas temperaturas, o que dificulta operações de usinagem e compactação. O SBS é o polímero que confere as melhores propriedades mecânicas ao Cimento Asfáltico Modificado. É de difícil incorporação, requer equipamentos sofisticados, formulação bem ajustada e bom controle das condições operacionais. A estabilidade durante a estocagem é o fator crítico e depende da origem do CAP.

A reciclagem de pneumáticos (processo via seca) ou modificador do Cimento Asfáltico (processo via úmida) vem sendo estudado por vários pesquisadores (PATRIOTA, 2004; PINHEIRO, 2004; SPECHT, 2004). Os pneus quando descartados em áreas inadequadas geram problemas de ordem ambiental e sanitária. No entanto, para SPECHT et al. (2007a; 2007b), a adição de borracha reciclada permite a aplicação de misturas asfálticas em uma amplitude maior de temperaturas ou sob condições mais severas de tráfego, aumenta a resistência a fadiga e a deformação plástica.

ODA (2000) destaca que há outras evidências de que a borracha de pneus usados podem melhorar algumas propriedades físicas e aumentara a vida útil do pavimento foram apresentadas por CHARANIA et al. (1991), SCHNORMEIER (1980, 1983 e 1986) e ROBERTS et al. (1989), que obtiveram resultados que indicam uma redução das tensões internas do ligante asfáltico a baixas temperaturas, e conseqüente aumento da resistência à formação de trincas por origem térmica, quando são adicionados o polímero SBR e a borracha de pneus.

Marques & da Paz (2007) afirmam que alguns processos para a reciclagem de pneus na fabricação de asfaltos modificados, em comparação aos outros processos de reciclagem, é ainda modesta. Em dezembro de 2008, a ANP publicou a Resolução no que estabelece as 22 especificações dos CAP modificados por borracha moída de pneus, designados asfalto borracha, comercializados no país (ANP, 2008).

Tabela 2.4 - Principais modificadores utilizados em ligantes asfálticos e os defeitos que eles procuram evitar
(Fonte: BAHIA et al. 1998)

TIPO DE MODIFICADOR	CLASSE	DEFEITOS		
		DP	TF	TT
POLÍMERO ELASTÔMERO	COPOLÍMERO ESTIRENO - BUTADIENO (SB)	X	X	X
	COPOLÍMERO ESTIRENO - BUTADIENO - ESTIRENO (SBS)	X	X	X
	BORRACHA ESTIRENO - BUTADIENO (SBR)	X	X	X
	BORRACHA DE PNEUS	x	x	x
POLÍMERO PLASTÔMERO HIDROCARBONETO	COPOLÍMERO ETILENO - ACETATO DE VINILA (EVA)	X	X	
	ASFALTO NATURAL	X	X	X
FIBRA	CELULOSE	X		X
	POLIPROPILENO	X	X	X
	POLYESTER	X		X
	MINERAL	x	x	x

DP – Deformação Permanente; TF – Trinca por Fadiga; TT – Trincas Térmicas

2.7 Misturas Mornas

Segundo AZARI et al. (2003, apud CERATTI 2007), a seleção de um intervalo apropriado de temperatura de compactação é um importante aspecto da preparação de corpos de prova em laboratório e de lançamento de misturas asfálticas, porque a temperatura afeta o teor ótimo de asfalto, o grau de envelhecimento, a absorção do asfalto, a estrutura do agregado e a densidade da mistura compactada, que por sua vez afetam o desempenho da mistura asfáltica. Os pesquisadores afirmam ainda que, as propriedades mecânicas parecem ser mais sensíveis às mudanças de temperatura de compactação do que a densidade.

Para o ASPHALT INSTITUTE (1980), a viscosidade do asfalto tem grande influência na compactação. A viscosidade alta tende a segurar o movimento das partículas dos agregados durante a rolagem. Se a viscosidade é muito baixa, as partículas movem-se facilmente durante a compactação, mas não ocorre coesão suficiente para manter as partículas na posição, uma vez completada a compactação. Portanto, é fundamental que a mistura asfáltica seja compactada dentro da faixa de temperatura adequada.

De maneira geral, quanto mais quente a mistura, mais fluido o asfalto e menos resistente é a mistura à compactação. Segundo o ASPHALT INSTITUTE (1989), o limite superior de temperatura de mistura é aproximadamente 150°C, pois, temperaturas maiores

podem causar danos ao asfalto pela aceleração d envelhecimento. Assim sendo, a melhor temperatura para iniciar a rolagem (compactação) é a máxima temperatura entre 85° e 150°C na qual a mistura suporte o rolo compactador sem deslocamentos horizontais ou fissuramento.

Segundo Ceratti (2007), os pesquisadores concluíram, portanto, que o intervalo de temperatura no qual as tensões cisalhantes são mínimas (menor resistência à tensão cisalhante quando compactada no compactador giratório) é o intervalo ótimo de temperatura de compactação, ou seja, a compactação naquelas temperaturas é mais eficiente (menor esforço de compactação) e proporciona maiores chances de se atingir as densidades desejadas.

As misturas asfálticas “mornas” diferem de outras misturas asfálticas pelas temperaturas nas quais são produzidas e pela resistência e durabilidade do produto final. O principal objetivo das misturas asfálticas “mornas” é alcançar resistência e durabilidade equivalentes ou superiores às das misturas asfálticas a quente (NEWCOMB, 2007). A diminuição da temperatura na produção de misturas asfálticas é muito desejável sob diversos aspectos. como a busca melhores resultados de trabalhabilidade garantindo melhor compactação; temperaturas de produção e aplicação reduzidas podem melhorar os resultados em pavimentação em climas frios e ainda representar menor envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação, podendo possibilitar melhor desempenho do pavimento aumentando a resistência ao trincamento.

Ceratti (2007) aponta três tecnologias que vêm se destacando na produção de misturas asfálticas mornas: o primeiro dos processos utiliza um sistema bi-componente, em dois estágios; o segundo método consiste na introdução de aditivos orgânicos de baixo ponto de fusão; já o terceiro processo que tem se mostrado bastante eficaz é a inserção de material zeolítico nas misturas asfálticas.

O primeiro ocorre devido à inserção de um ligante “leve” e um ligante “pesado” em forma de espuma, em tempos diferentes do processo de mistura. Essa combinação atua reduzindo a viscosidade da mistura asfáltica (ASPHALT, 2004; BARTHEL et al., 2004; LARSEN et al., 2004). No segundo processo os aditivos adicionados, modificam quimicamente a curva de viscosidade versus temperatura, como se resume esta pesquisa.

O último processo consiste na expansão do volume do ligante, e conseqüente redução da viscosidade, através da adição de zeólitas durante o ciclo de mistura, criando um efeito de micro-espuma no ligante (ASPHALT, 2004; BARTHEL et al., 2004).

Entre as diversas tecnologias desenvolvidas e utilizadas mundialmente para a produção de misturas asfálticas “mornas” é possível destacar: a utilização de aditivos orgânicos como o Sasobit®, uma cêra parafínica de baixo peso molecular.

Sasobit® é um produto comercializado pela Sasol Wax da África do Sul. É considerado um melhorador da viscosidade do asfalto, tanto durante a produção da mistura quanto durante a aplicação, devido a sua característica de reduzir a viscosidade do ligante asfáltico. Esta redução de viscosidade permite uma redução nas temperaturas de trabalho de cerca de 18 a 54°C. O produto, fornecido em flocos, pó ou líquido, é adicionado ao ligante asfáltico na usina em temperaturas variando Estudo de misturas asfálticas “mornas” entre 102 e 120°C não necessitando de misturadores especiais (HURLEY e PROWELL, 2006).

Segundo os autores, em aplicações realizadas na Ásia, Europa, África do Sul e Estados Unidos o Sasobit® foi adicionado diretamente à mistura de agregados na forma sólida (peletizado) ou na forma líquida empregando uma bomba dosadora. Não foram observadas alterações nos valores de estabilidade e fluência Marshall em comparação à mistura sem aditivo.

Desde 1997, mais de 142 projetos empregaram o Sasobit®, totalizando mais de 2 milhões de metros quadrados de pavimentos (Sasol Wax, 2006) em países como Áustria, Bélgica, China, França, Alemanha, Rússia, África do Sul, Reino Unido e Estados Unidos. Diversos tipos de agregados e misturas foram utilizados, entre eles o SMA (stone mastic asphalt). Os teores de Sasobit® adicionados variaram entre 0,8 e 4% da massa do ligante asfáltico.

2.8 Óleo de Mamona

O óleo de Mamona caracteriza-se por bastante estável em variadas condições de pressão e temperatura (COSTA E RAMOS, 2004). Ao contrário de outros óleos vegetais, permite larga faixa de condições de temperatura, que perdem viscosidade em altas temperaturas e se solidificam em baixas temperaturas, possuindo também estabilidade a oxidação (SAVY FILHO et al.1999). Não muda as suas propriedades em variações bruscas de temperatura, razão do seu imprescindível emprego na aviação (CARVALHO, 1991).

Nesse contexto, o óleo da Mamona mostra-se potencialmente útil para ser empregado como aditivo na melhoria das propriedades reológicas dos Cimentos Asfálticos. O óleo de

Mamona é um produto de uma oleaginosa, biodegradável e pode ser utilizado como “*Aditivo Verde*”, por suas características antioxidantes e suas propriedades “tensoativas”.

Mostra-se promissor para reduzir a elevada viscosidade dos Cimentos Asfálticos com ou sem aditivos, reduzindo gastos na usina, além de aumentar a estabilidade à estocagem e a adesividade nas misturas com os agregados. Com isso, apresenta-se como um fator de redução dos impactos ambientais e de outras substâncias orgânicas, durante as etapas de processamento do Cimento Asfáltico na pavimentação. Pode restringir o impacto em caso de derramamento direto nos mananciais ou seu arraste pelas águas da chuva.

No óleo de Mamona, cerca de noventa por cento (90%) do ácido graxo presente na molécula do triglicerídeo é o ácido ricinoléico (ác. 12-hidroxioléico), cuja fórmula molecular é $C_{17}H_{32}OHCOOH$, sendo os restantes dez por cento (10%) constituídos de ácidos graxos não hidroxilados, principalmente dos ácidos oléicos (3,5%) e linoléicos (4,5%). O valor de hidroxilas é da ordem de 163 mg de KOH/g para o produto, com grande pureza, recomendado para emprego em resinas poliuretânicas (PU). O óleo de Mamona puro é utilizado em teores de até vinte por cento (20%), junto com o poliálcool poliéter na fabricação de espumas flexíveis em bloco. Sua composição elementar e suas condições naturais conferem ao óleo suas características singulares, possibilitando ampla gama de utilização industrial, tornando a cultura da mamoneira importante potencial econômico e estratégico ao País.

O teor de óleo das sementes de Mamona pode variar de trinta e cinco por cento (35%) a cinquenta e cinco (55%) (VIEIRA et al. 1998), mas a maior parte das cultivares plantadas comercialmente no Brasil possuem teor de óleo variando entre quarenta e cinco por cento (45%) e cinquenta por cento (50%) (FREIRE et al. 2006). O óleo bruto é de coloração palha claro que, ao ser refinado, fica quase incolor, com odor característico.

2.8.1 O Uso do óleo de Mamona

As aplicações do óleo são inúmeras podendo ser empregado em vários processos industriais, na fabricação de tintas, protetores e isolantes (depois de desidratado), lubrificantes, cosméticos, drogas farmacêuticas, bem como a fabricação de corantes, anilinas, desinfetantes, germicidas, óleos lubrificantes de baixa temperatura, colas e aderentes, base para fungicidas e inseticidas, tintas de impressão e vernizes, além de nylon e matéria plástica, em que tem bastante importância. Transformado em plástico, sob a ação de reatores nucleares, adquire a resistência de aço, mantendo a leveza da matéria plástica.

O uso do óleo como lubrificante tem sido amplamente difundido, sobretudo em algumas situações específicas em que os óleos minerais tornam-se menos eficientes. Tal é o caso de certos equipamentos, como mancais ou engrenagens sujeitos ao arrefecimento por água. Além de seu baixo ponto de solidificação, em torno de 30°C negativos, outras qualidades do óleo de Mamona, tais como resistência ao escoamento e viscosidade elevada, o recomendam também como lubrificante de turbinas de aeronaves ou de veículos automotores que operam em regiões geladas. Suas características físico químicas favorecem, por outro lado, a sua utilização como fluido para freios hidráulicos de veículos, não denegrindo a borracha, metais ou plásticos. Na fabricação de espumas plásticas o óleo de Mamona confere ao material, texturas variáveis desde a macia e esponjosa até a dura e rígida.

Tais características estruturais e funcionais não somente conferem ao óleo de Mamona algumas de suas propriedades intrínsecas, como a elevada viscosidade ou a sua miscibilidade em álcool, mas também ativam a molécula tornando-a acessível a muitas reações químicas.

2.8.2 Extração do Óleo

O método utilizado para extrair o óleo pode ser a prensagem, a frio ou a quente, ou a extração por solvente. No caso do óleo medicinal, a prensagem das amêndoas é feita a frio, obtendo-se o óleo límpido, incolor e brilhante, livre do alcalóide tóxico ricina, com baixo teor de acidez e impurezas. O óleo medicinal ainda deve passar pelos processos de refinação e neutralização, para que seja absolutamente isento de acidez e de impurezas. Para a extração do óleo industrial pode ser utilizado a prensagem a frio, ou a quente, preferencialmente esta última, das sementes completas, obtendo-se óleo tipo *standard*, límpido, brilhante, que pode ter, no máximo, 1% de acidez e 0,5% de impurezas e umidade, depois de refinado. O óleo industrial também pode ser obtido da torta resultante da extração do óleo medicinal.

2.8.3 Especificações Técnicas do Óleo de Mamona

Na Tabela 2.5 e na Tabela 2.6 estão inseridas as características físico e químicas do óleo de Mamona respectivamente.

Tabela 2.5 - Físicas Valores de Referência: Physical and Chemical Characteristics of Oils, Fats, and Waxes - AOCS.
(Fonte: COSTA, 2006)

ÍNDICES	UNIDADES	VALOR DE REFERÊNCIA
PESO ESPECÍFICO (25°C)	g/cm ³	0,945-0,965
ÍNDICE DE REFRAÇÃO		1,473-1,477
ÍNDICE DE IODO	gl2/100g	81-91
ÍNDICE DE SAPONIFICAÇÃO	MG KOH/g	176-187

Tabela 2.6 – Química do Óleo de Mamona (Fonte: MOSHKIN, 1986)

ÁCIDOS GRAXOS	(%)
RINOLEICO	84-91
OLEICO	3,1-5,9
LINOLEICO	2,9-6,5
ESTERIÁRIO	1,4-2,1
PALMÍTICO	0,9-1,5

2.8.4 Cadeia Produtiva

A cadeia produtiva da Mamona é composta pelo produtor de matéria-prima, passa por diversos intermediários até a indústria processadora. Dessa, o óleo produzido é destinado à fabricação de derivados ou à exportação (SAVY FILHO, 2005).

A produção da Mamona no Brasil está em pequenas propriedades, com uso de agricultura familiar e baixa aplicação de tecnologia, resultando na produtividade média nacional de 500 kg/ha. Na maioria das vezes, esses produtores não estão associados, o que cria um grande número de atravessadores. Produtores em associação poderiam comercializar diretamente na indústria processadora, auferindo em maior rendimento (SAVY FILHO, 2005).

Reconhecido como o petróleo verde, o óleo de Mamona pode ser utilizado como fonte energética renovável em substituição ao óleo diesel. Com base em pesquisas de desenvolvimento de novas tecnologias, o óleo é considerado também matéria-prima do futuro, já que a Mamona é uma planta adaptada ao solo brasileiro podendo ser cultivada em qualquer parte do País (CHIERICE e CLARO NETO, 2001); porém, sua utilização mais atual é na obtenção do biodiesel, visto ser o único óleo solúvel em álcool e não necessitar de calor e do conseqüente gasto de energia, que requerem outros óleos vegetais em sua transformação para o combustível.

O óleo de Mamona tem elevado valor estratégico pelo fato de não existir bons substitutos em muitas de suas aplicações e pela versatilidade industrial (VIEIRA e LIMA, 2005); o segundo óleo vegetal mais bem cotado no mercado internacional, superior ao diesel mineral. Para 2004/5, estimaram-se preços oscilantes entre U\$730 e U\$900 a tonelada FOB – *Free on Board*, mas o preço recebido pelos produtores variou de R\$65 a saca de 60 kg, e no atacado, de R\$71 a saca de 60 kg (19/03/04) no período da entressafra.

Atualmente, nota-se um relativo crescimento nas áreas de cultivo da Mamona, e na exportação do seu óleo e outros produtos, o que vem levando ao seu aumento de preço e a novas parcerias na produção de Biodiesel. Segundo o site do CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento é possível obter informações quanto ao balanço da produção de Mamona em parâmetros nacionais, quanto aos valores de mercado, produção e extensão de áreas de cultivo.

O preço da Mamona comercializada no Brasil está atrelado ao preço internacional do óleo. O mercado remunera de acordo com diferentes classes de qualidade que são estabelecidas em função do nível de acidez, coloração, teor do *ácido graxo ricinoléico*, umidade, grau de pureza e outros aspectos. Atualmente encontra-se a tonelada do óleo da Mamona sendo comercializada entre 1 mil até R\$ 4 mil. Como exemplo pode-se citar o orçamento pedido para a empresa CAMPESTRE IND. E COM. DE ÓLEOS VEGETAIS LTDA em fevereiro de 2012, quanto ao preço do óleo de Mamona; e este fora estimado entre R\$ 12,00R\$ (doze Reais) o litro para pequenas quantidades; e de R\$9,00 (nove Reais) o litro para quantidades acima de 200 litros. Na Tabela 2.7, são demonstrados a evolução dos preços da mamona na Bahia.

Tabela 2.7 – Evolução dos preços reais recebidos pelos produtores – Irecê – BA

(Fonte: CONAB, 2012)

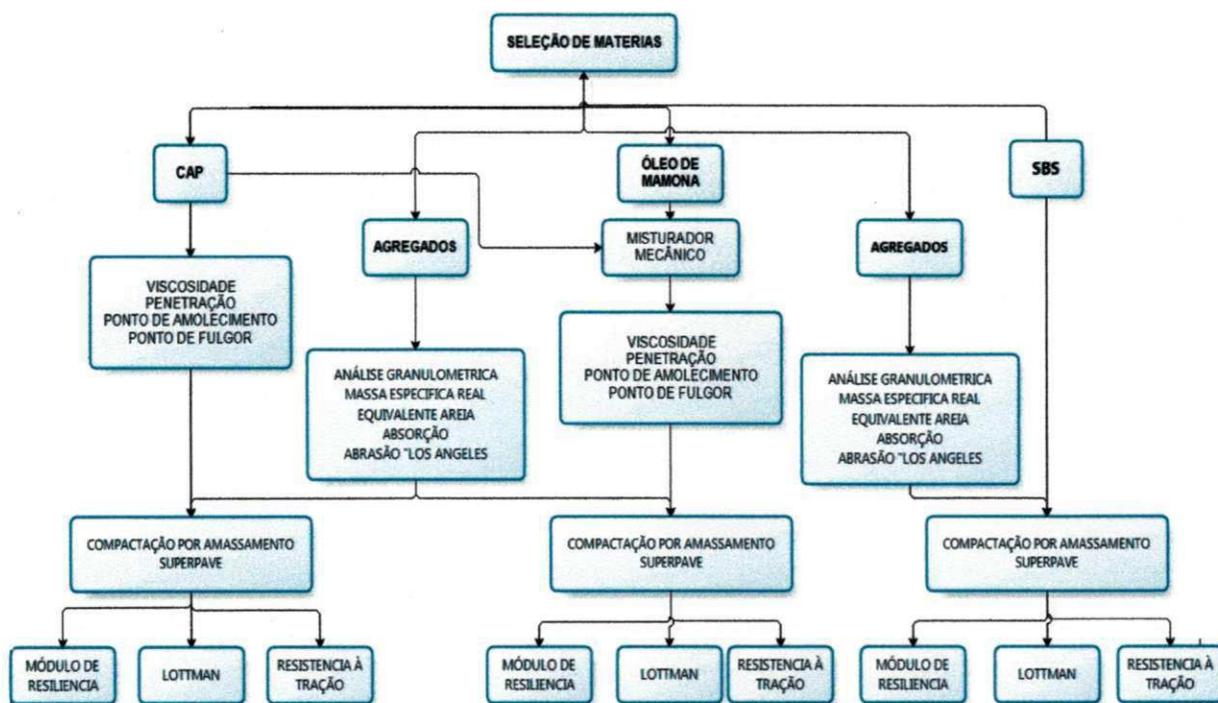
Ano	Evoluções dos Preços Reais da Mamona em Irecê - BA											
	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2006	27,00	33,00	31,00	29,38	29,00	19,91	31,00	35,60	37,00	36,00	38,20	39,00
2007	40,40	42,50	42,00	42,50	46,86	47,29	49,41	60,13	68,00	74,78	70,91	72,00
2008	72,25	76,25	72,75	74,40	77,75	83,75	67,20	59,75	68,75	72,20	59,75	61,50
2009	63,50	49,50	50,00	51,40	55,00	52,25	52,40	69,50	72,20	74,50	69,50	69,20
2010	70,00	70,00	71,40	70,75	72,75	73,80	74,25	77,00	80,00	69,50	60,25	62,60
2011	68,75	82,00	93,60	96,25	109,00	103,00	95,50	86,60	96,50			

CAPÍTULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS EMPREGADOS

Neste capítulo são descritos os procedimentos utilizados durante a fase experimental da pesquisa, os materiais utilizados e as especificações para a obtenção das propriedades físicas dos agregados, ligantes e, por conseguinte, do comportamento mecânico das misturas asfálticas projetadas, conforme é mostrado no Fluxograma 3.1. Os métodos de ensaios utilizados foram baseados em normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), do Departamento de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT) e da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO).

Fluxograma 3-1 – Seqüência de atividades e de ensaios realizados na fase experimental da pesquisa.



Fonte: autoria própria

3.1 Seleção dos Materiais

Neste subitem são enumerados os critérios estabelecidos para a seleção de materiais e descritos os tipos de materiais utilizados neste trabalho. Os critérios para escolha dos materiais visaram atender, também, as especificações e normas do DNIT, da ABNT e da AASHTO.

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram de origem de diferentes Estados, contudo, são comumente utilizados na maioria das rodovias da região Nordeste.

Os agregados graúdos e miúdos utilizados na pesquisa para a composição das misturas asfálticas foram obtidos a partir de pedra britada, de origem granítica proveniente de uma pedreira localizada próximo às margens da BR 101, locada no estado da Pernambuco; apresentando diâmetro máximo de *19 mm*, comumente utilizado na região para compor revestimentos asfálticos.

O CAP utilizado é de origem da *Empresa de Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste* – LUBNOR, que, como já foi dito anteriormente, é uma refinaria de petróleo da Petrobrás, situada no estado do Ceará, sendo uma das principais refinadoras atuantes na produção de ligantes asfálticos de petróleo, abastecendo várias regiões do país, devido à sua qualidade de refino e ao seu comprometimento com a engenharia de transportes e pavimentos no país.

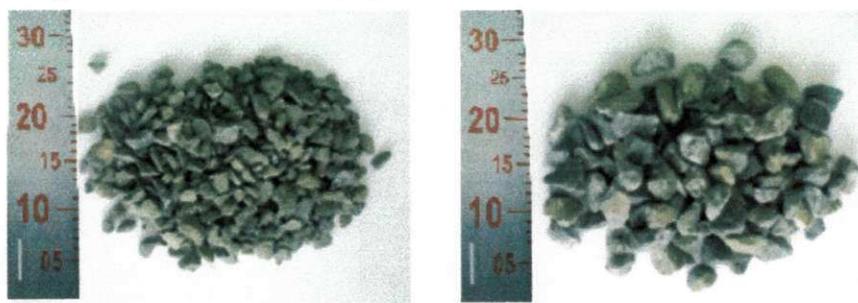
O óleo de Mamona utilizado na composição das misturas asfálticas foi obtido no Laboratório de Química Orgânica, situado no Bloco CX da Universidade Federal de Campina Grande, PB.

3.1.1 Materiais Granulares

Agregados Graúdos

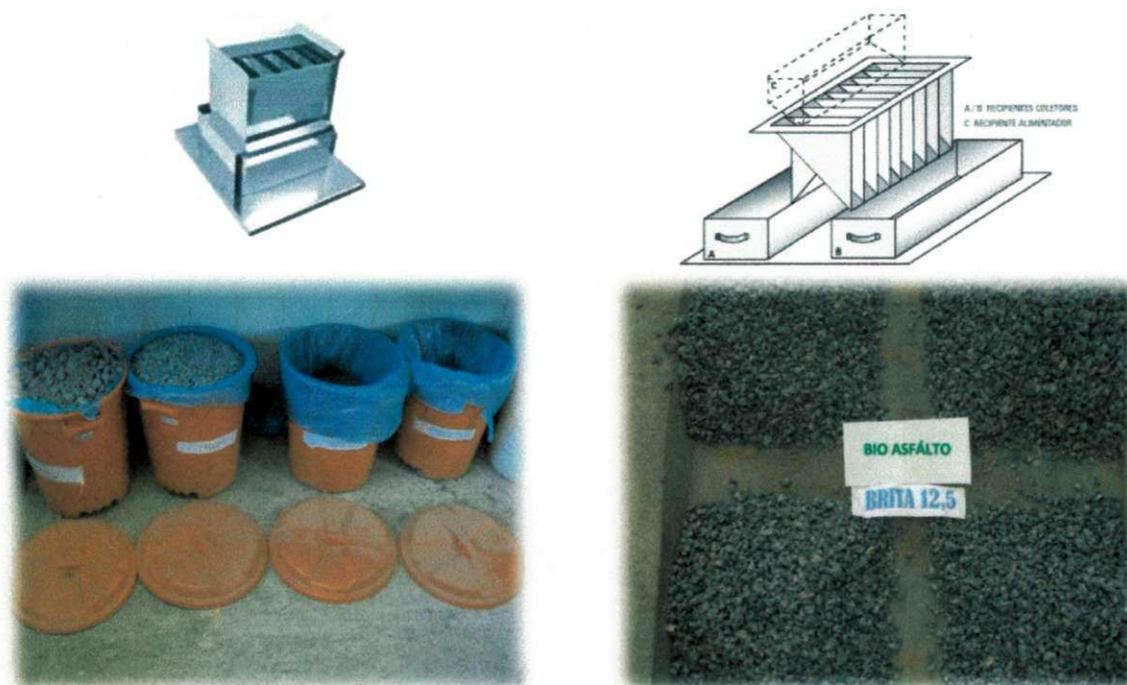
Os agregados graúdos utilizados nesta pesquisa são apresentados na Figura 3.1.

Figura 3-1 - Ilustração dos agregados graúdos Brita 12,5 mm; Brita 19,0 mm.



Sabendo-se da importância das propriedades físicas dos materiais granulares utilizados nesta pesquisa, foi realizada sua homogeneização (quarteamento), e a forma de acondicionamento antes das realizações de ensaios. Os materiais foram acondicionados em baldes de 50 Kg, revestidos por sacolas plásticas, após serem quarteados e secos em estufas, como apresentados na Figura 3.2 a seguir. Na mesma figura estão dispostos os layouts dos equipamentos para quarteamento dos agregados e os baldes de armazenamentos para o desenvolvimento das misturas.

Figura 3-2 - Forma de acondicionamento & Quarteamento prévio.



Agregados Miúdos

Os agregados miúdos utilizados na pesquisa foram do tipo miúdo natural de origem em pedreira localizada próximo às margens da BR 101, conforme ilustrado na Figura 3.3:

Figura 3-3 - Ilustração dos agregados miúdos: Areia de Campo e Pó-de-Pedra.



3.1.2 Cimento Asfáltico de Petróleo

O CAP utilizado na pesquisa foi do tipo 50/70 cujas especificações estão de acordo com a Agência Nacional de Petróleo (ANP), a qual define os parâmetros de aceitação e classificação. A caracterização física do CAP foi obtida a partir da realização dos ensaios realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LEP), inseridas na Tabela 3.1.

O Cimento Asfáltico de Petróleo utilizado foi recebido e armazenado em um recipiente de boa qualidade, ou seja, sem ferrugem ou ranhuras. Após a abertura, o CAP foi acondicionado em pequenos recipiente metálicos de 480 g.

Tabela 3.1 - Propriedades físicas do CAP utilizado na Pesquisa.

CARACTERÍSTICAS	VALOR
PENETRAÇÃO DNIT 155/2010 – ME	61,75
PONTO DE AMOLECIMENTO (°C) DNIT 131/2010 – ME	44 - 45
DENSIDADE (g/cm³) DNIT 009/1998 – ME	1,02
VISCOSIDADE BROOCKFIELD (CPs) [135°C, 155°C, 177°C] ASTM D 4402	718 346 126

3.1.3 Óleo de Mamona

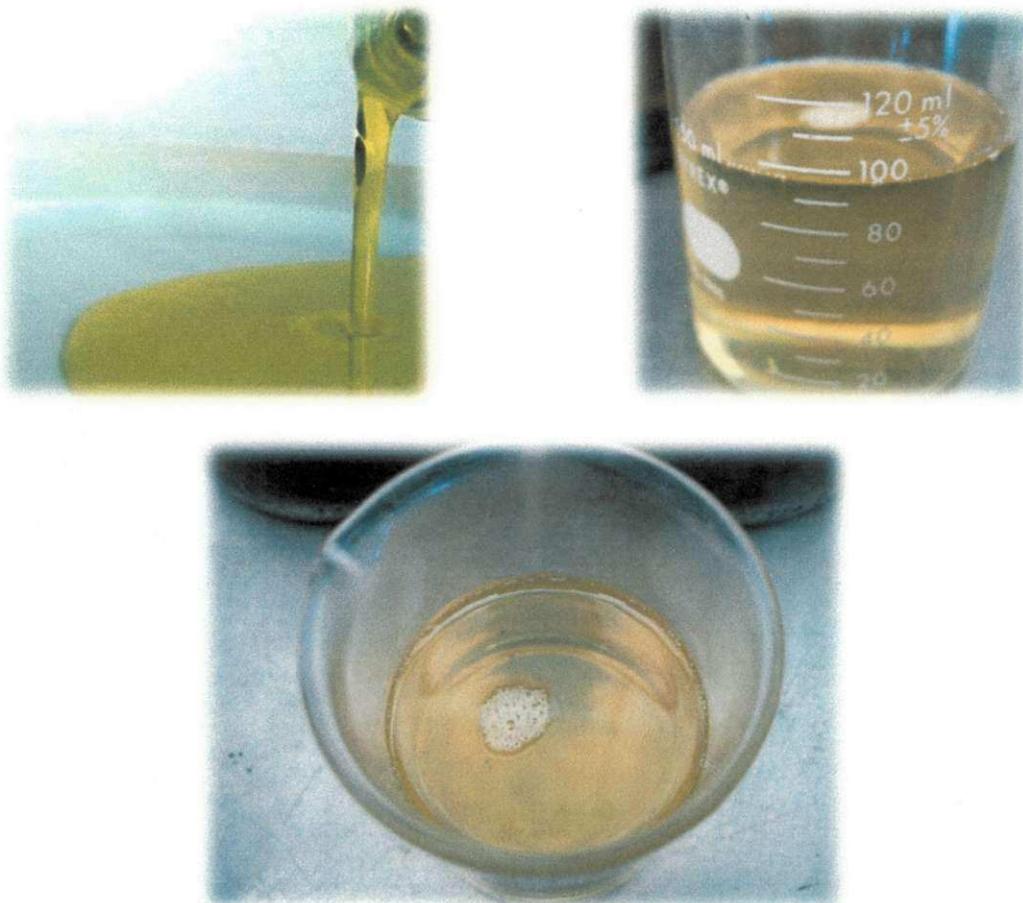
Na Figura 3.4 está apresentado o óleo de Mamona utilizado na pesquisa. Este material foi obtido no Laboratório de Química Orgânica da Universidade Federal de Campina Grande. Na Tabela 3.2 estão dispostos os valores médios das características físico químicas do óleo de Mamona utilizado nesta pesquisa; por extração mecânica à frio e industrial.

Tabela3.2 – Características Físico Químicas do óleo de Mamona

TIPO DE ÓLEO	VARIÁVEIS					
	TEOR DE ÁGUA	ÍNDICE DE ACIDEZ (mg K OH/g)	ÍNDICE DE IODO (g i/100g)	Índice de Peróxido (meq/1000g)	ÍNDICE DE SAPONIFICAÇÃO (mg K OH/G)	ÍNDICE DE REFRAÇÃO
ÓLEO DE MAMONA	0,65	0,15	0,86	0,18	5,05	1,11

Fonte: autoria própria

Figura 3-4 – Óleo de Mamona utilizado nas misturas asfálticas.



3.1.4 Laboratórios Utilizados

Os equipamentos utilizados serão descritos a seguir, em conjunto com os tipos de ensaios e de suas respectivas normas, os quais foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil da UFCG - LEP/DEC/UFCG (Figura 3.5).

Figura 3-5 - Laboratório de Engenharia de Pavimentos LEP/DEC/UFCG.



3.2 Estudos das Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais

3.2.1 Agregados

Os ensaios para a obtenção da distribuição dos tamanhos das partículas dos agregados graúdos e miúdos por peneiramento, bem como os ensaios de massa específica real, de equivalente areia e de Abrasão “Los Angeles” foram realizados após o prévio quarteamento do material. Na Tabela 3.3 estão inseridas as normas que foram adotadas para a realização dos referidos ensaios.

Tabela 3.2 - Ensaios e Normas de especificações Brasileiras.

ENSAIOS	METODOLOGIA
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS POR PENEIRAMENTO	DNIT - ME 083/98
MASSA ESPECÍFICA REAL DOS AGREGADOS GRAÚDOS	DNIT - ME 081/98
MASSA ESPECÍFICA REAL DOS AGREGADOS MIÚDOS	DNIT - ME 084/95
EQUIVALENTE AREIA	DNIT - ME 054/97
ABRASÃO “LOS ANGELES”	DNIT - ME 035/98
ABSORÇÃO	DNIT - ME 081/98

Granulometria dos agregados

A distribuição dos tamanhos das partículas dos agregados foi determinada seguindo a norma ME 083/98 do DNIT. Para este ensaio, como o próprio nome sugere, foi realizado o peneiramento de todos os agregados isoladamente, por uma série de peneiras, o qual determinou em percentagem o peso que cada faixa especificada de tamanho de partículas representa na massa total ensaiada. Diante do resultado deste ensaio, é possível traçar as respectivas curvas de distribuição granulométrica, tão importante para a classificação, como para a estimativa dos parâmetros volumétricos de uma mistura asfáltica.

Na Figura 3.6 são mostradas, respectivamente, uma série de peneiras e uma demonstração do peneiramento manual.

Figura 3-6 - Série de peneiras e peneiramento manual



Massa específica real dos agregados graúdos e absorção

Tendo como principal fundamentação o princípio de Arquimedes, segundo o qual um corpo submerso num líquido desloca um volume deste igual ao volume do próprio corpo, o ensaio de densidade real tem como objetivo determinar o valor da massa específica das partículas; sendo essencial no cálculo da DMT (Densidade Máxima Teórica), utilizado para a determinação dos parâmetros volumétricos e, por conseguinte, no teor asfáltico de uma mistura.

O valor da massa específica na condição seca, é obtida a partir da Equação 3:

$$\gamma_s = \frac{A}{B - C}$$

Equação 3

Onde:

γ_s = massa específica do agregado seca, em kg/dcm³ ou em g/cm³;

A= massa do agregado seco, em kg ou g;

B= massa do agregado na condição saturada superfície seca, em kg ou g;

C= leitura do correspondente ao agregado imerso em água.

Para a realização dos ensaios supracitados, seguiu-se a norma ME 081/98 do DNIT.

Assim como o ensaio de densidade real é essencial para estimativa do teor de asfalto na mistura, o ensaio de absorção também possui uma influência no teor do projeto. A porosidade de um agregado é normalmente indicada pela quantidade de água que ele absorve quando imerso. Um agregado poroso irá também absorver ligante asfáltico, consumindo parte do ligante necessário para dar coesão a uma mistura asfáltica. Para compensar esse fato, deve-se incorporar à mistura asfáltica uma quantidade adicional de ligante. Portanto, a percentagem de absorção de um agregado é essencial para a determinação e a classificação do mesmo em projeto.

Durante o ensaio a amostra é lavada e seca à temperatura entre 105°C e 110°C, em estufa. Após ter esfriado, subseqüentemente, se imerge o agregado em água por aproximadamente 24 horas. Em seguida, se remove a amostra da água secando-a sobre um pano absorvente e, logo após, é realizada a medição, com a balança, de sua massa úmida e, depois, de sua massa imersa em água. E por fim, é necessário secar a amostra em estufa e obter sua massa seca. O processo é mostrado na Figura 3.7.

O Valor em percentagem é obtido pela seguinte Equação 4:

$$y_s = \frac{B}{A - C} \quad \text{Equação 4}$$

Equivalente Areia

É a razão volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível superior da areia e a altura do nível de suspensão de argila de uma determinada quantidade de agregado miúdo, objetivando detectar a presença de finos plásticos.

Calculou-se o equivalente como segue na Equação 5:

$$EA = \frac{\text{Leitura no topo da areia}}{\text{Leitura no topo da argila}} \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

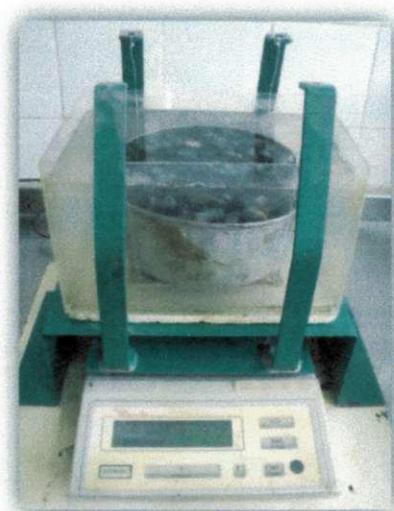
Onde:

EA = Resultado do ensaio, obtido de uma média aritmética de três determinações, é expresso em percentagem arredondando-se o número inteiro.

Leitura no topo de argila – distância do traço de referência superior da proveta ao nível da suspensão argilosa, em mm;

Leitura do topo de areia – distância do topo do disco que se apóia na boca da proveta à base inferior do cilindro do pistão quando a sapata estiver apoiada em areia, em mm:

Figura 3-7 - Etapas do Ensaio de Absorção.



Abrasão Los Angeles

Segundo a norma ME 035/98 do DNIT, o ensaio é definido como o desgaste sofrido pelo agregado, quando colocado na máquina de ensaio Los Angeles juntamente à uma carga abrasiva, submetida a um determinado número de revoluções desta máquina à velocidade de 30 à 33 rpm, O desgaste é convencionalmente expresso pela porcentagem, em peso, do material passante, após o ensaio na peneira de malhas quadradas de 1,7mm ou peneira nº 12 da ABNT.

A Abrasão *Los Angeles*, foi calculada pela seguinte Equação 6.

$$A_v = \frac{M_n - M'_n}{M_n}$$

Equação 6

Onde :

A_v = Abrasão *Los Angeles* de graduação n, com aproximação 1% ;

n= Graduação escolhida para ensaio. (A,B,C,D,E,F,ou D);

M_n = Massa total da amostra seca, colocada na máquina ;

M'_n = Massa da amostra lavada e seca, após o ensaio.

Figura 3-8 – Ensaio de abrasão “Los Angeles”.



3.2.2 Cimento Asfáltico

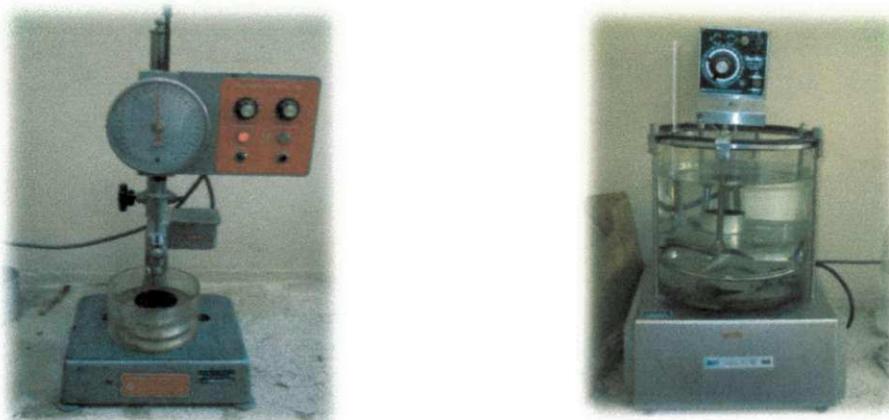
Ensaio de Penetração

Segundo a Norma do DNIT 155/2010 – ME, define-se penetração na profundidade, em décimos de milímetro, uma agulha padrão penetra verticalmente na amostra de material sob condições prefixadas de carga, tempo e temperatura.

O ensaio foi executado dentro das condições exigidas e é mostrado na figura 3.9, em um penetrômetro, nas condições de tempo de 5s, 100g à 25°C. O banho de água, para conter o recipiente com amostra, deve ter capacidade mínima de 10 litros, tendo uma prateleira perfurada situada, pelo menos, a 50 mm do fundo, devendo a lâmina de água sobre a amostra

ter mais do que 100 mm e ser capaz de manter a temperatura de ensaio com precisão de $\pm 0,1$ °C.

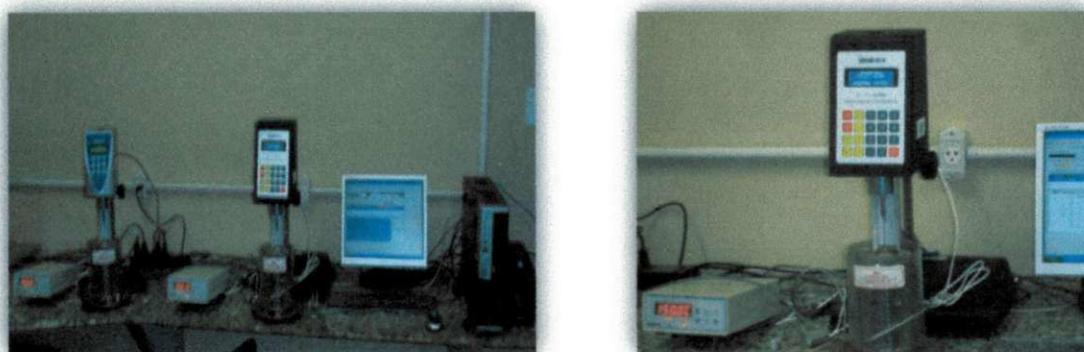
Figura 3-9 – Penetrômetro & Banho para a amostra à 25°C.



Viscosímetro Rotacional (Brookfield)

O ensaio foi realizado seguindo a norma D 4402 da ASTM– *Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. Caracteriza as propriedades reológicas dos ligantes convencionais e modificados durante manuseio do asfalto, nas temperaturas de 135, 155 e 170°C, a partir do torque necessário para rotacionar um *splindle* imerso na amostra de aproximadamente **8 gramas** de asfalto à velocidade de 20 rpm, presente nas especificações atuais dos ligantes brasileiros desde 2005. Na Figura 3.10 é apresentado o equipamento do laboratório de engenharia de pavimentos/UFCG.

Figura 3-10 - Viscosímetro Rotacional (Brookfield).

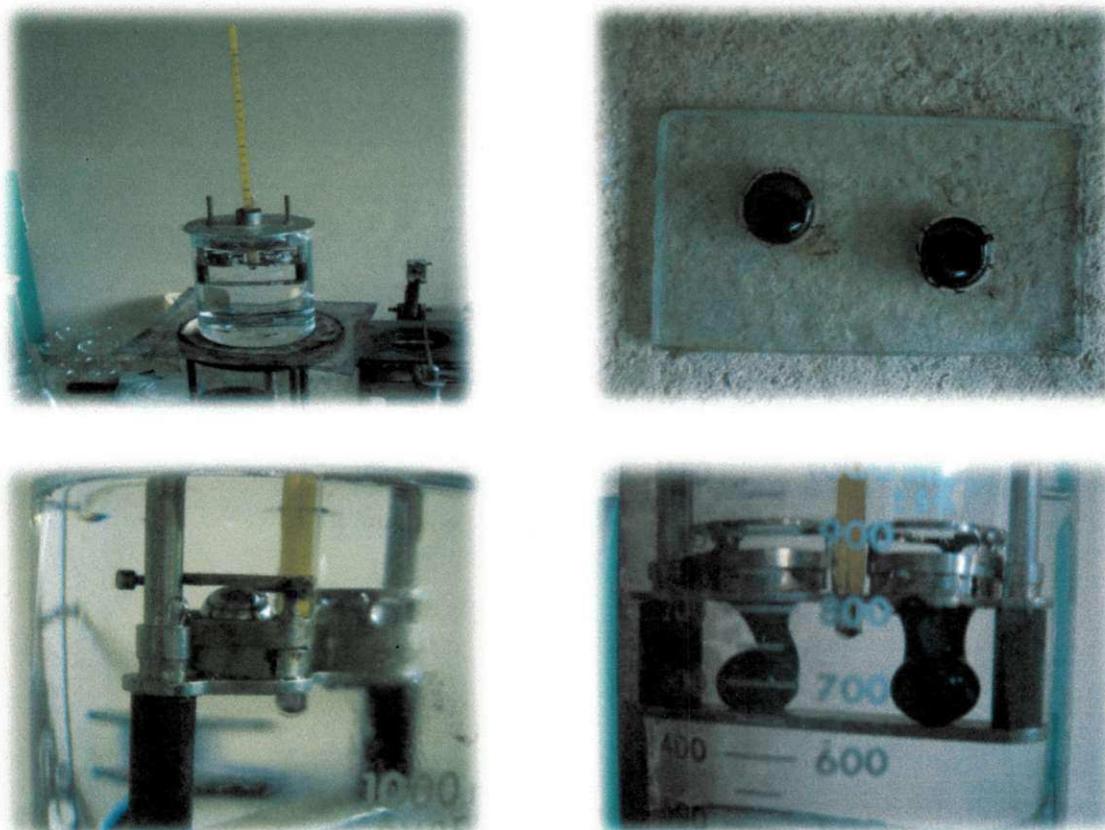


Este ensaio foi essencial para o desenvolvimento desta pesquisa; a partir de seus resultados partiu-se para a determinação das temperaturas de usinagem e compactação, tanto para o CAP convencional como para o modificado com óleo de Mamona. Diante dos acervos de dados, foram determinados, assim, os parâmetros para a escolha de quatro (04) teores óleo vegetal (Mamona), na dosagem Superpave, com o objetivo de determinar e avaliar as características mecânicas das misturas com este ligante modificado.

Ponto de Amolecimento

Este método prescreve o modo pelo qual deve ser determinado o Ponto de Amolecimento dos materiais asfálticos na faixa de 30°C a 157°C, utilizando a aparelhagem Anel e Bola. Para a realização deste ensaio, tomou-se a norma do DNIT 131/2010 – ME, e foram seguidas todas as etapas, desde a preparação da amostra, à razão de temperatura de controle de aquecimento da água para a realização do ensaio. Na Figura 3.11, são apresentados os equipamentos utilizados.

Figura 3-11 - Equipamentos utilizados para a realização do ensaio de ponto de amolecimento.

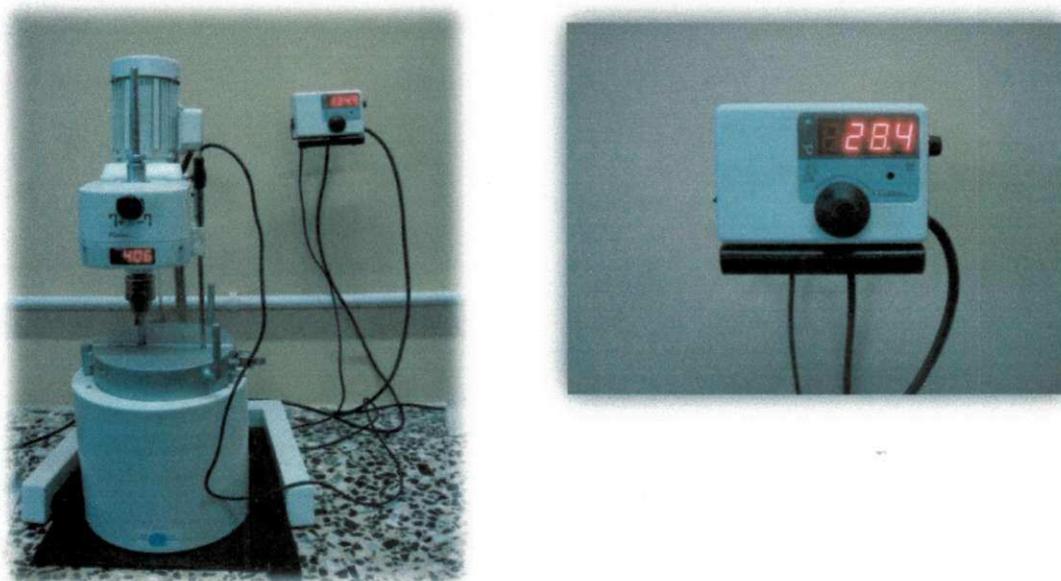


3.3 Adição do óleo de Mamona ao CAP

Nesta etapa, iniciou-se o processo de produção do CAP modificado, a partir da adição de teores do óleo de Mamona variando de 3% à 10%, em um agitador mecânico (FISATOM, Modelo 722 : Figura 3.12) com as condições de temperatura e rotações controladas.

Primeiramente foram aquecidos 500g de CAP 50/70 a uma temperatura de 120°C em estufas. Em seguida, colocou-se o ligante puro em um misturador mecânico com a manta pré-aquecida à mesma temperatura, com rotações de 300 rpm. Ao ser atingida a temperatura de 135°C, foram adicionados os percentuais relativos do Óleo de Mamona e elevou-se o número de rotações para 406 rpm, mantendo-se em um intervalo de 20 minutos para obtenção de uma homogeneização perfeita. Decorrido este tempo, a nova composição foi retirada do misturador, deixando-a esfriar à temperatura ambiente e estocando-a adequadamente para uso. Esta metodologia foi baseada na Tese de Doutorado de Adalberto Leandro Faxina.

Figura 3-12 - Misturador mecânico com controladores de temperatura e rotações.



3.4 Dosagem das Misturas Asfálticas

3.4.1 Misturas Asfálticas

Nesta pesquisa foram utilizadas seis (06) misturas asfálticas, com composições granulométricas diferentes em seu tipo de cimento asfáltico utilizado, tendo como referência a Faixa C, preconizada pelo DNIT. O critério adotado para a escolha da faixa foi a frequência de seu uso em rodovias no Nordeste Brasileiro.

Foram compostas três (03) misturas, compreendendo curvas granulométricas próximas ao limite superior, inferior e intermediário, relativas à Faixa adotada para a verificação do enquadramento das misturas compostas em laboratório, em relação aos limites pré-estabelecidos pelo procedimento de Dosagem Superpave.

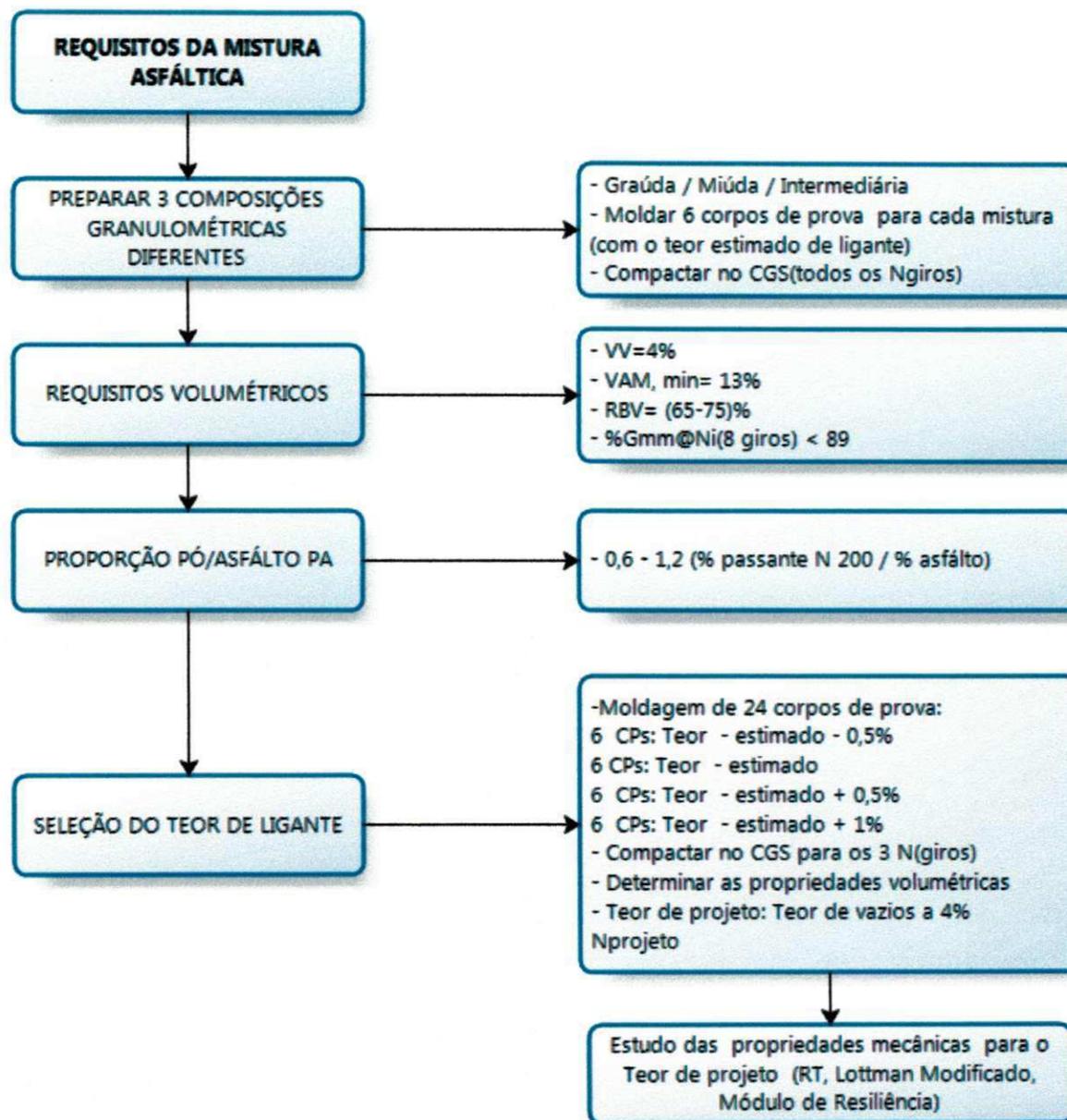
Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram utilizadas três (03) tipos de misturas diferenciadas pelo tipo de CAP, a saber: a) CAP Convencional, b) CAP Modificado com SBS, e c) CAP modificado com a adição de teores de óleo de Mamona, sendo estas compostas por quatro (04) misturas com teores distintos.

O procedimento Superpave de Dosagem da Mistura Asfáltica consistiu nas seguintes etapas: 1 – Definição de três composições granulométricas dentro da Faixa C do DNIT; 2 - Cálculo do valor teórico do teor de asfalto inicial; 3 – Definição do teor de ótimo de Asfalto baseados em critérios volumétricos; e, 4 – Estudos das propriedades mecânicas da mistura asfáltica composta com o teor ótimo (Fluxograma 3.2).

A premissa principal da dosagem SUPERPAVE é que a quantidade de ligante usada deve ser tal que a mistura atinja 4% de vazios no número de giros do projeto. Caso isso não ocorra nas misturas experimentais feitas inicialmente, é realizada uma estimativa do teor de ligante que deverá atender esta exigência. Por este método, é facultado ao projetista escolher qual das misturas testadas, entre as três composições granulométricas, melhor atende os critérios das propriedades volumétricas especificadas para o projeto (MARQUES, 2001).

A partir do teor de ligante estimado são moldados os corpos de prova considerando outros três teores, além do teor estimado: teor estimado $\pm 0,5\%$ e $+ 1\%$. O teor final de projeto é aquele na qual a mistura asfáltica atenda ao critério de volume de vazios igual a quatro pontos percentuais (4%).

Fluxograma 3-2 – Seqüência de atividades utilizadas para a dosagem Superpave.



Fonte: autoria própria

3.5 Estudos das Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas

Os estudos sobre as propriedades mecânicas das misturas asfálticas foram realizados com base nos resultados obtidos a partir dos ensaios de *Resistência à Tração Indireta por*

Compressão Diametral (RT), do dano por umidade induzida (Ensaio de *Lottman Modificado*) e do ensaio para a obtenção do Módulo de Resiliência em corpos de prova submetidos à Tração Indireta por compressão diametral.

3.5.1 Compactação dos Corpos de Prova

A compactação dos corpos de provas foi realizada por amassamento com o auxílio do compactador giratório, segundo a norma ASTM D 6925-08 (*Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor - 2011*), como é mostrado na figura 3.13.

Figura 3-13 – Compactador Giratório do Tipo SGC pertencente ao LEP.

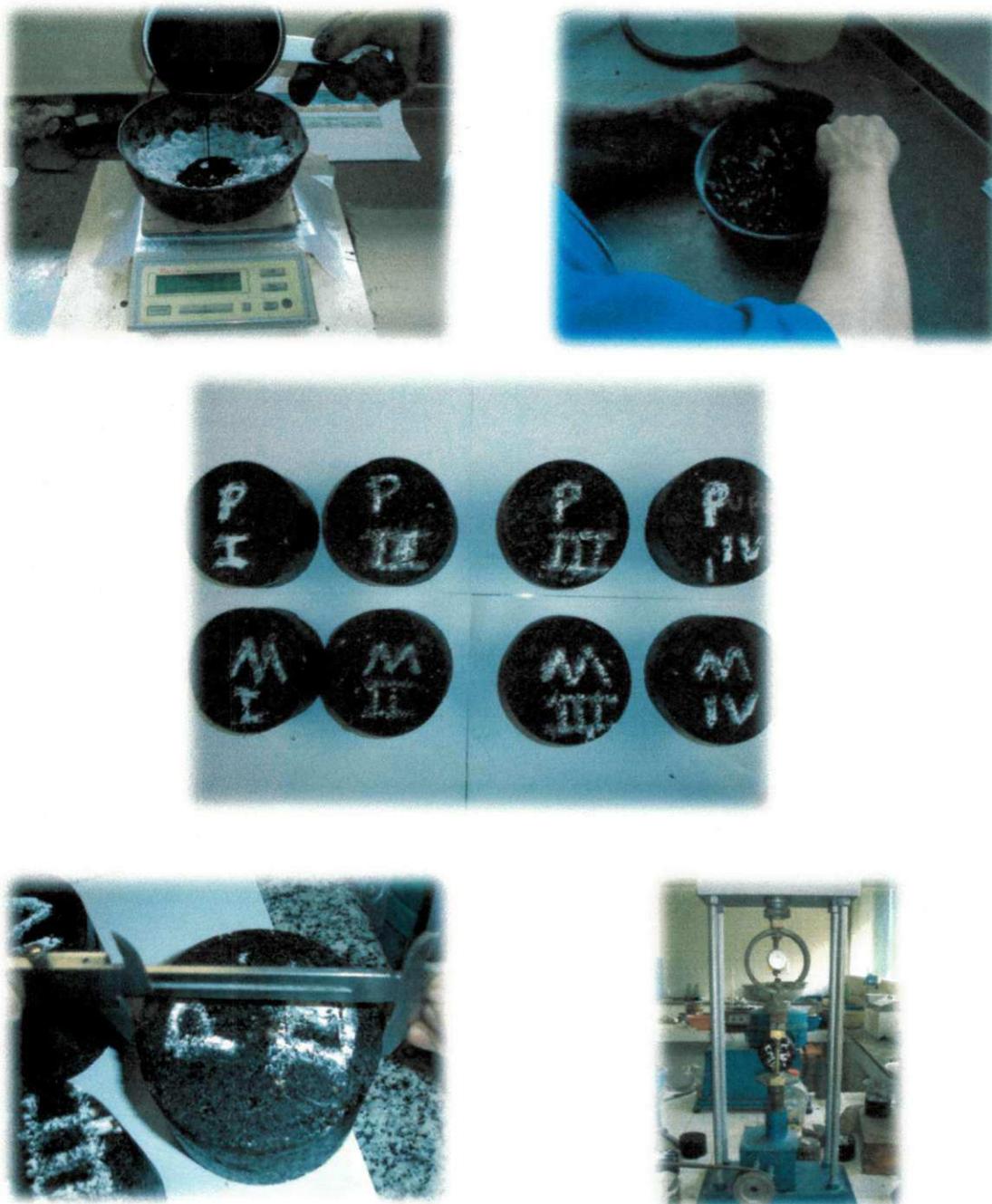


3.5.2 Ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral (RT)

O ensaio de Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral foi realizado segundo a Norma ME 136/2010 do DNIT. Os corpos de prova foram preparados com o teor ótimo de asfalto e com o índice de vazios correspondentes aos obtidos pela Dosagem Superpave.

Nesta etapa foram moldados doze (12) corpos de prova, correspondentes às Misturas Asfálticas: Mistura Convencional (02 CPs), Mistura com 3% de óleo de Mamona (02 CPs), Mistura com 5% de óleo de Mamona (02 CPs), Mistura com 7% de óleo de Mamona (02 CPs), Mistura com 9% de óleo de Mamona (02 CPs), e a Mistura com SBS (02 CPs), compactadas por amassamento (SGC). Na Figura 3.14, é possível observar os equipamentos utilizados para a realização das composições e a realização dos ensaios de RT.

Figura 3-14 – Equipamentos utilizados para a realização dos ensaios de RT.



3.5.3 Ensaio de Lottman

No ensaio de Resistência ao Dano por Umidade Induzida em misturas asfálticas (Lottman Modificado) as amostras compactadas de misturas asfálticas com teores de vazios preestabelecidos foram parcialmente saturadas com água e submetidas a baixas temperaturas que refletissem as que ocorrem na região mais fria do Nordeste durante um período de tempo

estabelecido em norma, simulando a presença de água na mistura e tensões internas induzidas por cargas do tráfego.

O primeiro conjunto de amostras à temperatura de equilíbrio de 25°C foi submetido ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT'). O segundo conjunto similar de amostras compactadas cilíndricas regulares, submetidas ao processo de saturação e "congelamento", foram igualmente submetidas ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) à temperatura de 25°C. A relação entre as resistências à tração antes e depois da indução do dano por umidade deve ser maior ou igual a 0,70 (AASHTO) e 0,80 pelo o procedimento Superpave, ou seja, a perda de resistência não deverá ser superior a 30% e 20% respectivamente.

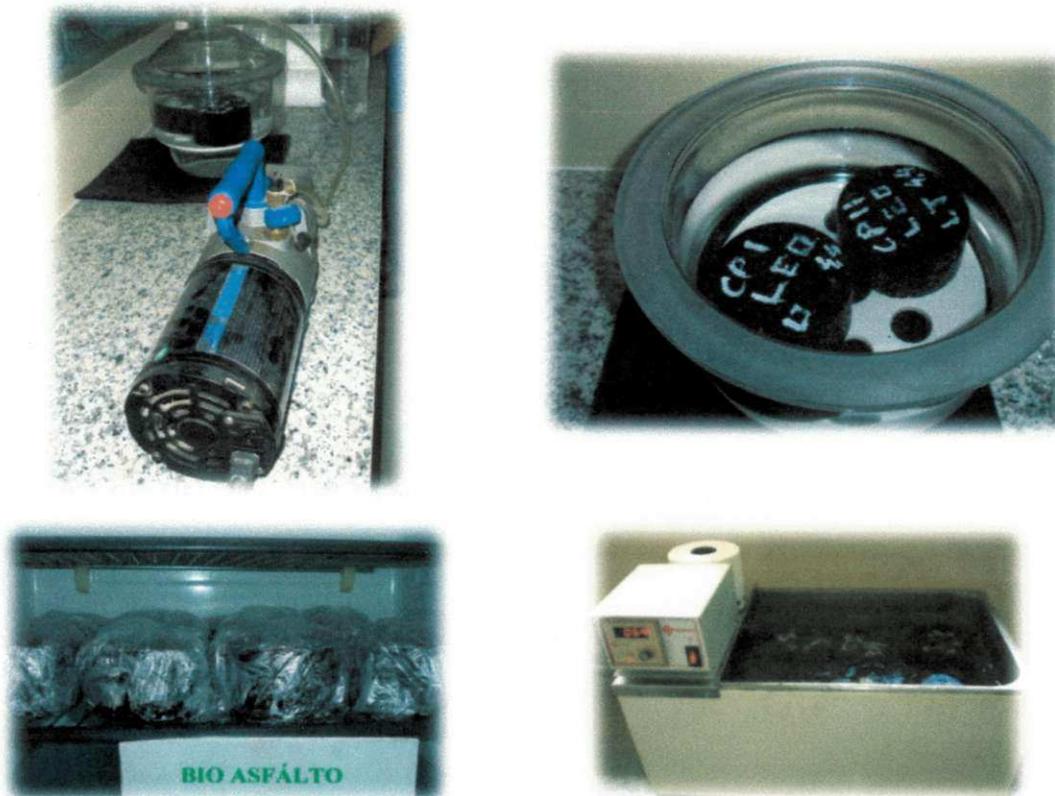
Foram moldados doze (12) corpos de prova para a Faixa C de estudo e submetidos ao condicionamento, de ciclo de resfriamento, com a temperatura do revestimento estimada em dez graus Celsius (10°C) que corresponde à mínima atingida para a região Nordeste, e que difere do valor de dezoito graus Celsius negativo (-18°C), valor estabelecido pela a Norma T 283-02 da AASHTO.

Os corpos de prova moldados e submetidos ao ensaio corresponderam as Mistura Asfálticas; Mistura Convencional (02 CPs), Mistura com 3% de óleo de Mamona (02 CPs), Mistura com 5% de óleo de Mamona (02 CPs), Mistura com 7% de óleo de Mamona (02 CPs), Mistura com 9% de óleo de Mamona (02 CPs), e a Mistura com SBS (02 CPs), compactadas por amassamento (SGC).

O ensaio de Lottman foi realizado segundo a Norma ME 136/2010 do DNIT e a Norma da AASHTO T 283-02, com o auxílio da prensa Marshall e do pórtico de Lobo Carneiro. Na Figura 3.15 estão dispostos os equipamentos e as etapas que complementam o ensaio RT para o condicionamento dos corpos de provas à variações de temperatura e a ação deletéria da água.

O ensaio de Lottman é adotado pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) desde 1985, tendo ganhado aceitação pelas agências de transportes dos EUA. Ele combina as boas características de dois ensaios: *Lottman test* e *Tunncliff and Root conditioning* (ROBERTS et al. 1996).

Figura 3-15 - Equipamentos utilizados no ensaio de Lottman Modificado.



3.5.4 Ensaio de Módulo de Resiliência

O ensaio de Módulo de Resiliência foi realizado de acordo com as Normas D4123 - 82 e ME - 135/2010, da ASTM e do DNIT, respectivamente. Na Figura 3.16 se encontram as fotos dos equipamentos utilizados para a realização do ensaio. A força utilizada para o ensaio de Módulo de Resiliência foi correspondente a 10% da Resistência à Tração obtida para cada Mistura Asfáltica com o seu respectivo teor de CAP.

Os ensaios foram realizados com a aplicação de cargas repetidas num intervalo de 0,1s, e repouso de 0,9s, no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico. Essa carga gerou uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação da carga, e medidores LVDT foram utilizados para medir o deslocamento diametral recuperável na direção correspondente à tensão gerada (deslocamento horizontal). Esta aplicação de carga visa simular o efeito do tráfego de veículos. Nas Figuras 3.17 e 3.18 são mostrados a interface do programa de ensaio, e o relatório resumo, com o valor dos dados processados e do módulo de resiliência para cada ensaio, respectivamente.

Figura 3-16 - Equipamentos – Ensaio do Módulo de Resiliência.

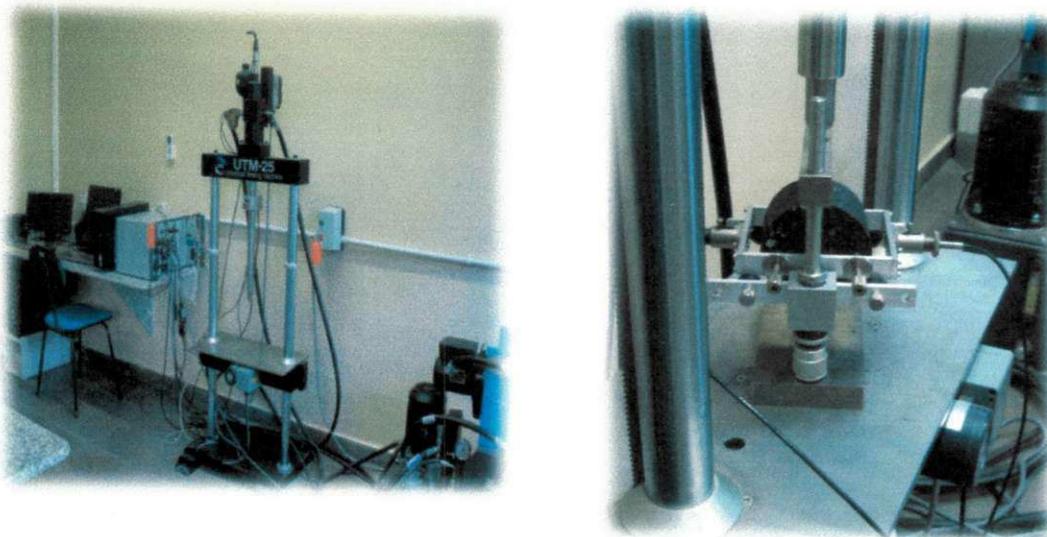


Figura 3-17 - Interface de trabalho do programa utilizado para a realização do ensaio de Módulo de Resiliência.

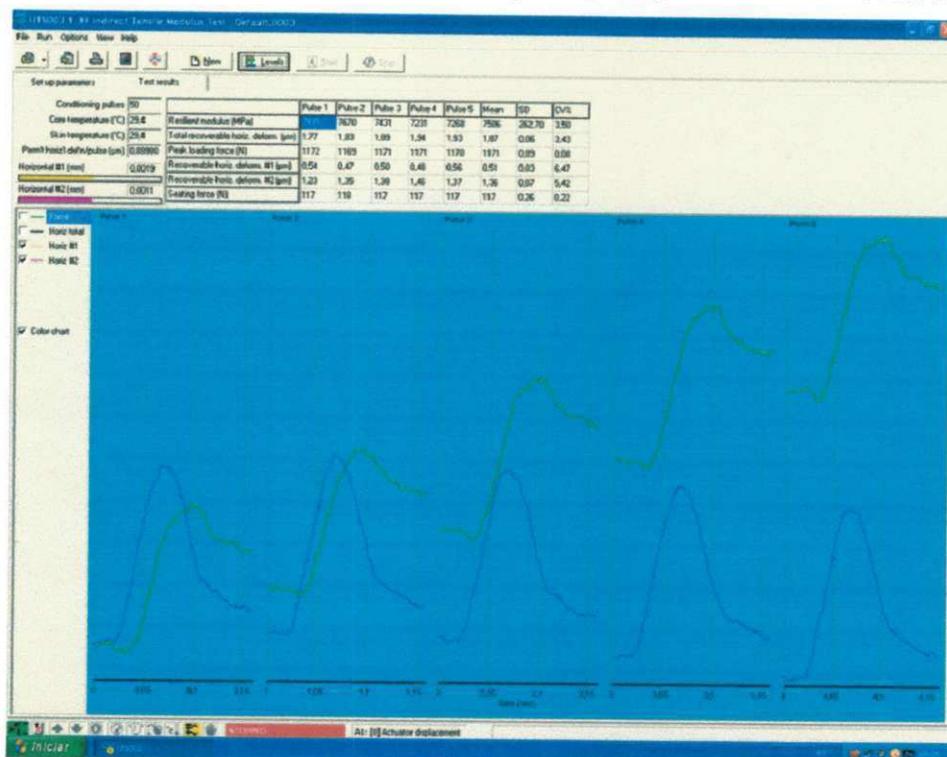
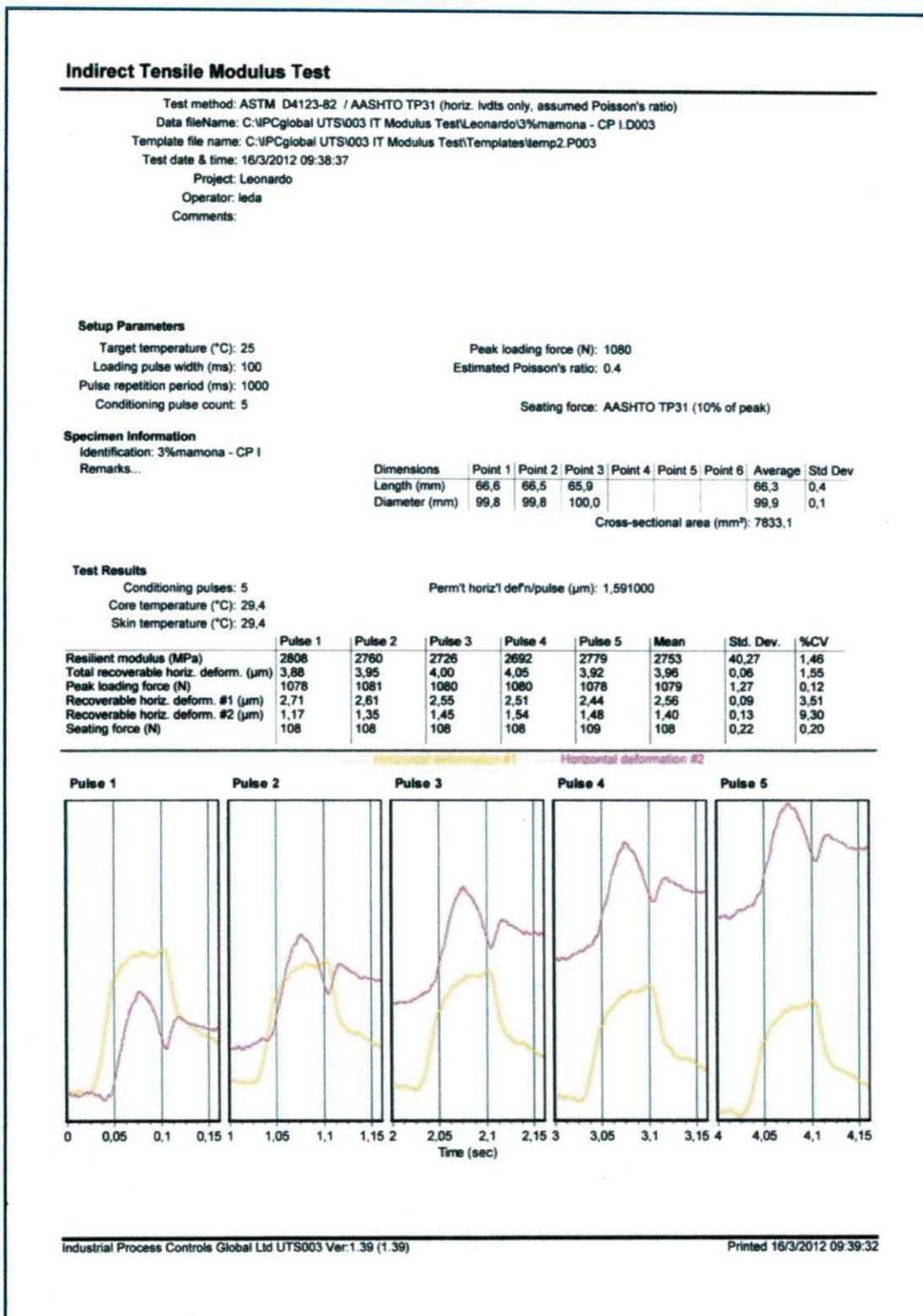


Figura 3-18 – Relatório gerado pelo programa utilizado para o processamento dos dados e cálculos do M_R .



CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse capítulo foi dividido em três itens, para uma melhor compreensão da análise dos resultados, a saber:

- ✓ Propriedades Físicas dos Materiais individualizados;
- ✓ Dosagem das Misturas Asfálticas;
- ✓ Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas;

4.1 Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais individualizados

Neste item serão apresentados os resultados inerentes às propriedades físicas dos materiais individualizados utilizados nesta pesquisa.

4.1.1 Distribuição dos Tamanhos das Partículas dos Materiais Granulares

A distribuição dos tamanhos das partículas dos agregados tem influência significativa no comportamento mecânico da mistura asfáltica, tais como: a rigidez, a durabilidade, a resistência ao cisalhamento, a fadiga e a deformação permanente, o dano por umidade induzida, etc.

Na Tabela 4.1 e na Figura 4.1 estão inseridos os resultados da distribuição dos tamanhos das partículas dos agregados (valores e curvas lançadas em gráfico). A partir destas foram estabelecidas as proporções dos agregados graúdos e miúdos, de acordo com as especificações da Faixa granulométricas “C” preconizadas pelo DNIT, para a obtenção do teor ótimo de asfalto pelo procedimento Superpave (Tabela 4.2 e Figura 4.2; Tabela 4.3 e Figura 4.4; Tabela 4.5 e Figura 4.6).

Em seqüência, apresentados na Figura 4.2, na Figura 4.4 e na Figura 4.6, estão lançadas em gráfico as distribuições dos tamanhos das partículas para as composições calculadas e obtidas após o peneiramento, denominadas, respectivamente, *Teóricas e Reais*, inerentes aos Limites Inferior, Intermediário e Superior da Faixa C do DNIT na ordem de citação.

Ao analisar os resultados das composições granulométricas, obtidas a partir das proporções estabelecidas em função de cálculos numéricos (Método Analítico), pode-se observar que as misturas compostas estão dentro dos limites pré-estabelecidos pela Faixa C do DNIT, e que não há dispersões significativas entre as proporções calculadas e as obtidas em laboratório (Composições *Teóricas e Reais*).

Observa-se, também, que todas as composições foram consideradas satisfatórias segundo os critérios de dosagem de misturas asfálticas preconizados pelo Procedimento Superpave, o qual estabelece restrições de distribuição dos tamanhos das partículas e que são denominados de *Curva de Densidade Máxima; Pontos de Controle e Zona de Restrição*, parâmetros estes relacionados ao *Diâmetro Nominal Máximo*. Com isso, podemos inferir, segundo o que preconiza o referido procedimento, que as misturas de agregados obtidas estarão menos sujeitas aos acréscimos de deformação permanente, à ruptura por cisalhamento, bem como contém uma volumetria adequada (volume de vazios), fugindo discretamente das Curvas de Densidade Máxima das respectivas misturas.

Tabela 4.1 - Distribuição dos tamanhos das partículas dos agregados.

Peneira	Diâmetro (mm)	Brita 19,1	Brita 12,5	Areia	Pó de Pedra
1"	25,4	100	100	100	100
3/4"	19	90,63	100	100	100
1/2"	12,7	54,02	98,25	100	100
3/8"	9,5	24,14	85,73	100	100
Nº4	4,8	3,44	20,41	99,5	95,23
Nº 10	2	1,92	3,33	92,29	67,88
Nº 40	0,42	1,61	1,67	56,32	34,49
Nº 80	0,18	1,35	1,35	23,01	19,36
Nº 200	0,074	0,65	0,87	5,05	9,83

Figura 4-1 - Curvas Granulométricas dos agregados.



Tabela 4.2 – Composição dos agregados estabelecida com a aproximação do Limite Inferior [Faixa C do DNIT].

Peneira	Brita 19,1		Brita 12,5		Areia		Pó de Pedra		PROJETO	ESPECIFICAÇÃO	
	TOTAL	32%	TOTAL	29%	TOTAL	0%	TOTAL	39%		PT. MED	LIMITES
1 1/2"	100,00	32,00	100,00	29,00	100,00	0,00	100,00	39,00	100,00	-	-
1"	100,00	32,00	100,00	29,00	100,00	0,00	100,00	39,00	100,00	-	-
3/4"	90,63	29,00	100,00	29,00	100,00	0,00	100,00	39,00	97,00	100	100
1/2"	54,02	17,29	98,55	28,58	100,00	0,00	100,00	39,00	84,87	80	100
3/8"	24,14	7,72	85,72	24,86	100,00	0,00	100,00	39,00	71,58	70	90
N°4	3,44	1,10	20,4	5,92	99,50	0,00	95,23	37,14	44,00	44	72
N° 10	1,92	0,61	3,33	0,97	92,29	0,00	67,88	26,47	28,05	22	50
N° 40	1,61	0,52	1,67	0,48	56,32	0,00	34,49	13,45	14,45	8	26
N° 80	1,35	0,43	1,34	0,39	23,01	0,00	19,36	7,55	8,37	4	16
N° 200	0,65	0,21	0,86	0,25	5,05	0,00	9,83	3,83	4,29	2	10

Figura 4-2 - Curva de Fuller da composição dos agregados [Limite Inferior da Faixa C do DNIT].

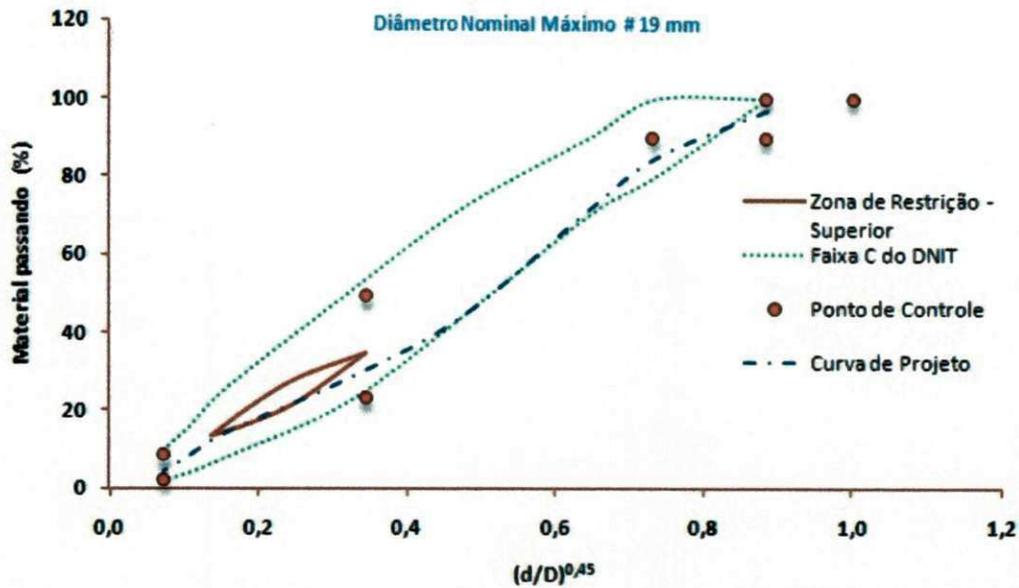


Figura 4-3 - Curvas de projeto Teórica e Real [Limite Inferior da Faixa C do DNIT].

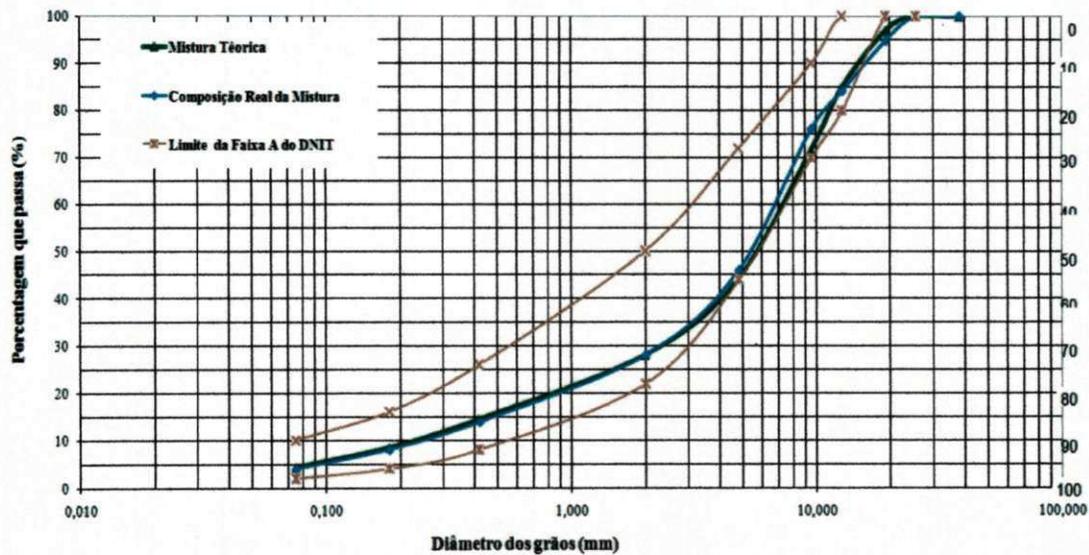


Tabela 4.3 – Composição dos agregados estabelecida com a aproximação do Limite Intermediário [Faixa C do DNIT].

Peneira	Brita 19,1		Brita 12,5		Areia		Pó de Pedra		PROJETO	ESPECIFICAÇÃO	
	TOTAL	19%	TOTAL	27%	TOTAL	9%	TOTAL	45%		PT. MED	LIMITES
1 1/2"	100,00	19,00	100,00	27,00	100,00	9,00	100,00	45,00	100,00	-	-
1"	100,00	19,00	100,00	27,00	100,00	9,00	100,00	45,00	100,00	-	-
3/4"	90,63	17,22	100,00	27,00	100,00	9,00	100,00	45,00	98,22	100	100
1/2"	54,02	10,26	98,55	26,61	100,00	9,00	100,00	45,00	90,87	80	100
3/8"	24,14	4,59	85,72	23,14	100,00	9,00	100,00	45,00	81,73	70	90
Nº4	3,44	0,65	20,4	5,51	99,50	8,96	95,23	42,85	57,97	44	72
Nº 10	1,92	0,36	3,33	0,90	92,29	8,31	67,88	30,55	40,12	22	50
Nº 40	1,61	0,31	1,67	0,45	56,32	5,07	34,49	15,52	21,35	8	26
Nº 80	1,35	0,26	1,34	0,36	23,01	2,07	19,36	8,71	11,40	4	16
Nº 200	0,65	0,12	0,86	0,23	5,05	0,45	9,83	4,42	5,23	2	10

Figura 4-4 - Curva de Fuller da composição dos agregados [Limite Intermediário da Faixa C do DNIT].

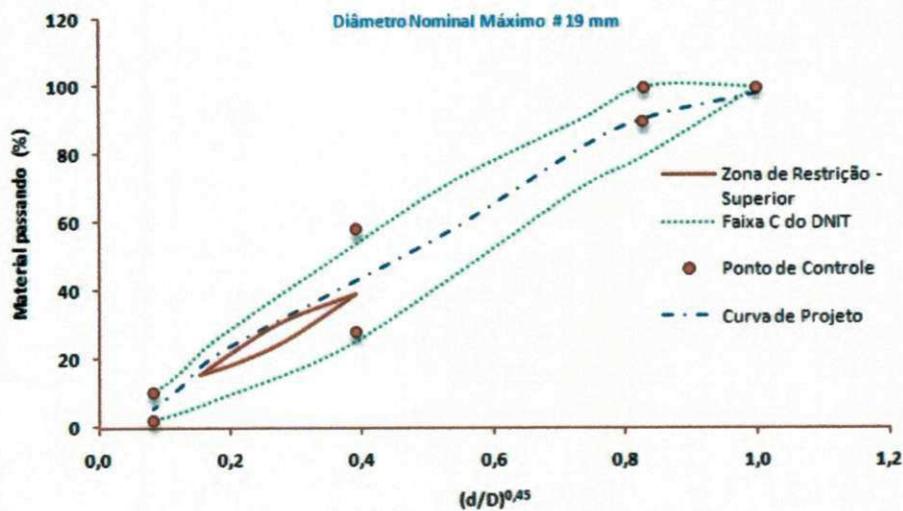


Figura 4-5 - Curvas de projeto *Teórica e Real* [Limite Intermediário da Faixa C do DNIT].

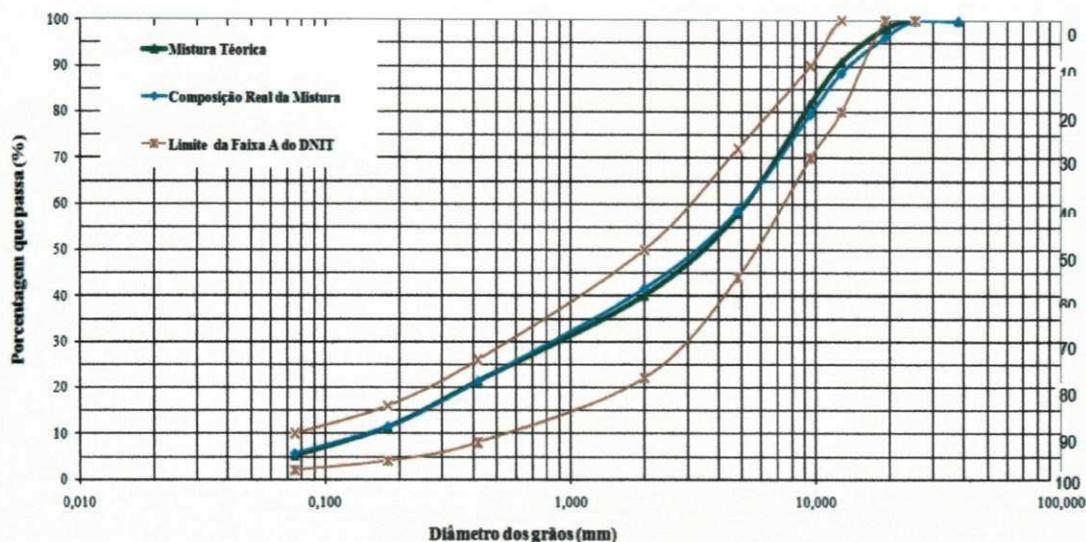


Tabela 4.4 – Composição dos agregados estabelecida com aproximação do Limite Superior [Faixa C do DNIT].

Peneira	Brita 19,1		Brita 12,5		Areia		Pó de Pedra		PROJEITO	ESPECIFICAÇÃO	
	TOTAL	23%	TOTAL	21%	TOTAL	22%	TOTAL	34%		PT. MED	LIMITES
1 1/2"	100,00	23,00	100,00	21,00	100,00	22,00	100,00	34,00	100,00	-	-
1"	100,00	23,00	100,00	21,00	100,00	22,00	100,00	34,00	100,00	-	-
3/4"	90,63	20,84	100,00	21,00	100,00	22,00	100,00	34,00	97,84	100	100
1/2"	54,02	12,42	98,55	20,70	100,00	22,00	100,00	34,00	89,12	80	100
3/8"	24,14	5,55	85,72	18,00	100,00	22,00	100,00	34,00	79,55	70	90
Nº 4	3,44	0,79	20,4	4,28	99,50	21,89	95,23	32,38	59,34	44	72
Nº 10	1,92	0,44	3,33	0,70	92,29	20,30	67,88	23,08	44,52	22	50
Nº 40	1,61	0,37	1,67	0,35	56,32	12,39	34,49	11,73	24,84	8	26
Nº 80	1,35	0,31	1,34	0,28	23,01	5,06	19,36	6,58	12,24	4	16
Nº 200	0,65	0,15	0,86	0,18	5,05	1,11	9,83	3,34	4,78	2	10

Figura 4-6 - Curva de Fuller da composição dos agregados [Limite Superior da Faixa C do DNIT].

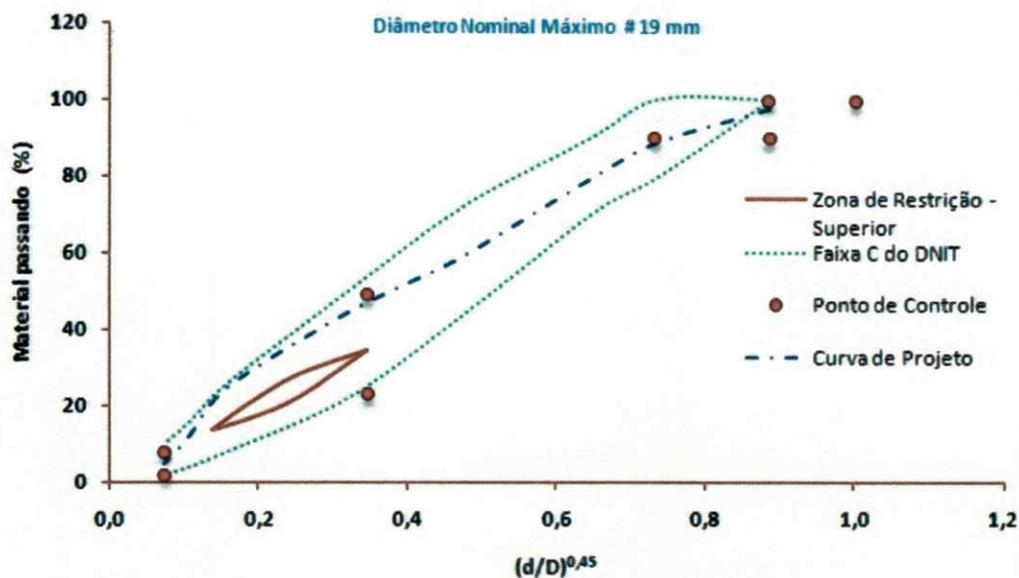
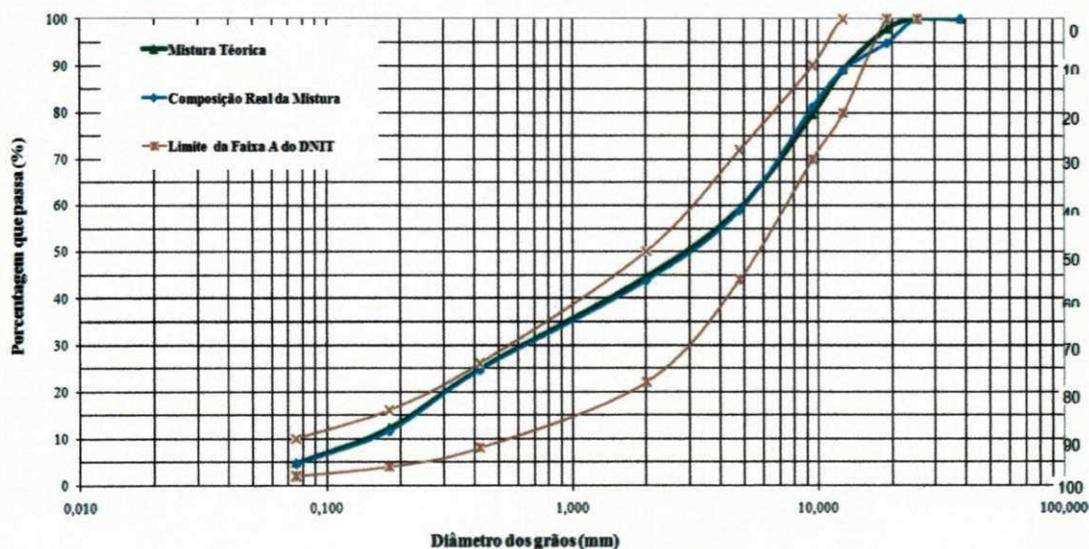


Figura 4-7 - Curvas de projeto Teórica e Real [Limite Superior da Faixa C do DNIT].



4.1.2 Ensaio de Equivalente de Areia

O ensaio de equivalente de areia, descrito na norma DNER-ME 054/97, determina a proporção relativa de materiais do tipo argila ou pó em amostras de agregados miúdos. Para este ensaio, para que um agregado possa ser utilizado em concreto asfáltico, o equivalente de

areia deve ser de pelo menos 55%, o que se verificou na areia e pó de pedra utilizados nesta pesquisa, que resultaram especificamente em 68% e 56%.

4.1.3 Peso Específico Real e Aparente

Na Tabela 4.5 e na Tabela 4.6 estão inseridos os pesos específicos reais e aparentes dos agregados graúdos e miúdos, areia e pó de pedra, que foram utilizados nas composições das misturas asfálticas estudadas. Estes resultados foram utilizados para as determinações das propriedades de estado (volumetria) das misturas, tais como: Densidade Máxima Teórica (DMT); Volume de Vazios (VV), Relação Betume Vazios (RBV), etc.

Tabela 4.5 - Peso específico real e aparente dos agregados graúdos utilizados nas misturas asfálticas.

DIÂMETRO (mm)	PESO ESPECÍFICO REAL (g/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (g/cm ³)
19,1	2,77	2,76
12,7	2,64	2,63

Tabela 4.6 – Peso específico real dos agregados miúdos utilizados nas misturas asfálticas.

TIPO DE AGREGADO	MASSA ESPECÍFICA REAL (g/cm ³)
AREIA	2,65
PÓ DE PEDRA	2,59

4.1.4 Abrasão Los Angeles e Absorção dos agregados graúdos

O resultado do ensaio de Abrasão “Los Angeles”, de 28,4 % para o agregado de *Diâmetro Nominal Máximo* de 19 mm, ficou abaixo do valor preconizado pela Norma brasileira (ME 035/98 do DNIT) para os serviços de pavimentação cujo valor da abrasão “Los Angeles” (LA) deve ser menor que 40% ou 55%, portanto, compatível para a utilização em misturas asfálticas.

Os resultados do ensaio de absorção dos agregados graúdos estão inseridos na Tabela 4.7 (ME 081/98 do DNIT). Os agregados apresentaram uma absorção relativamente baixa,

característica de agregados de porosidade pequena, o que faz indicar que esta propriedade não influenciará negativamente na estimativa do teor ótimo de asfalto.

Tabela 4.7 - Resultado do ensaio de absorção.

DIÂMETRO (mm)	RESULTADO EM %
19,1	2,77
12,7	2,64

4.1.5 Ensaio de Penetração e Ponto de Amolecimento

Na Tabela 4.8 e na Tabela 4.9 estão expressos os resultados dos Ensaio de Penetração e de Ponto de Amolecimento para os tipos de CAP utilizados.

Os CAPs puros e com Polímero não apresentaram variações significativas de penetração compatível com a sua classificação, enquanto a adição sucessiva de óleo de Mamona ao CAP Puro teve como resultados a diminuição da viscosidade com conseqüente aumento da penetração.

A adição de óleo de Mamona nas misturas até o valor de 5% apresentou valores de penetrações e ponto de amolecimento compatíveis com os obtidos para o CAP Puro e com SBS. Isto indica que o acréscimo de óleo de Mamona tem um limite acima do qual as propriedades do “mastique” (CAP + óleo) não devem atender às exigências normativas.

Portanto, os estudos das propriedades mecânicas da misturas asfálticas compostas com os respectivos teores de óleo de Mamona e de agregados são essenciais para a definição do melhor teor de óleo a ser adicionado.

Tabela 4.8 - Resultados do ensaio de penetração: CAP Puro; SBS; CAP + Óleo de Mamona variando de 2%,3%, 5%, 7%, 9% à 10% de adição do óleo.

ENSAIO PENETRAÇÃO (ME 155/2010 - DNIT)	TIPO DE LIGANTE																																
	CAP PURO			S.B.S			CAP + 2% MAMONA		CAP + 3% MAMONA		CAP + 4% MAMONA		CAP + 5% MAMONA		CAP + 6% MAMONA		CAP + 7% MAMONA		CAP + 8% MAMONA		CAP + 9% MAMONA		CAP + 10% MAMONA										
RESULTADOS (0,1mm)	59	61	62	61	60	61	53	54	56	54	54	57	56	58	58	58	60	62	70	75	74	76	80	76	88	90	96	90	105	112	115	110	120
MÉDIA	61			61			54		55		57		60		73		77		91		102		115										

Figura 4.8 - Penetração em barras [Valores das Médias].

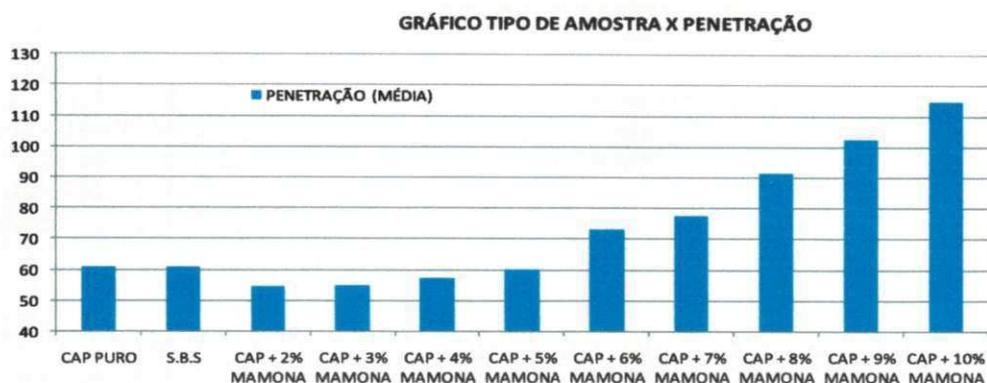
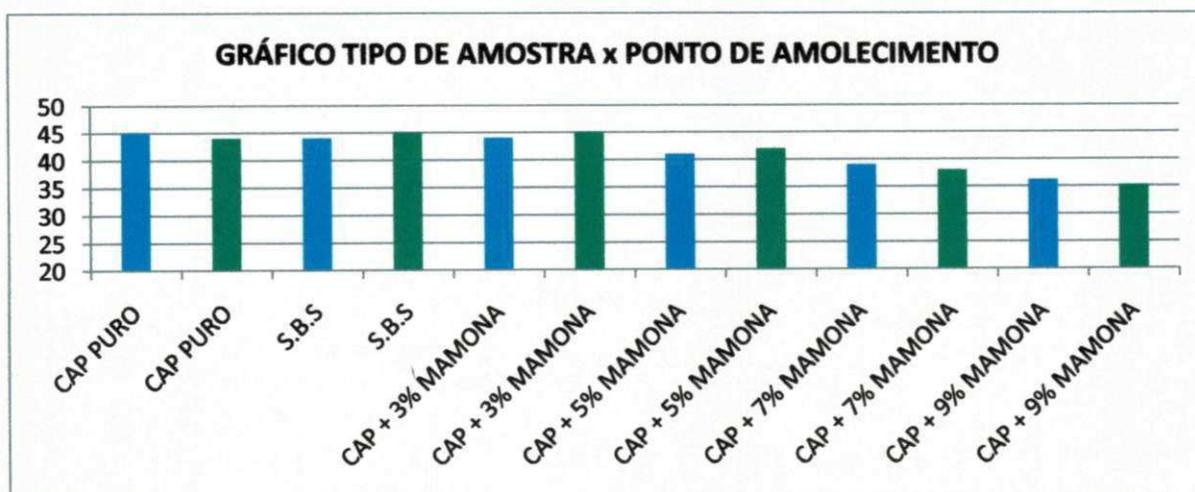


Tabela 4.9 - Resultados do ensaio de ponto de amolecimento: CAP Puro; SBS; CAP + Óleo de Mamona nos teores de 3%, 5%, 7%, e 9% de adição do óleo.

ENSAIO PONTO DE AMOLECIMENTO (ME 131/2010 DO DNIT)	TIPO DE LIGANTE											
	CAP PURO		S.B.S		CAP + 3% MAMONA		CAP + 5% MAMONA		CAP + 7% MAMONA		CAP + 9% MAMONA	
RESULTADO TEMPERATURA (°C)	45	44	44	45	44	45	41	42	39	38	36,2	35,2

Figura 4-9 - Ponto de Amolecimento [Valores Individuais].



4.1.6 Ensaio de Viscosidade Brookfield

Os resultados do ensaio com o equipamento da Brookfield permitiram uma análise mais adequada da influência da adição do óleo de Mamona sobre o comportamento mecânico do CAP, uma vez que, com o auxílio deste, foi possível obter a variação da viscosidade (Pa.s.) com o acréscimo dos teores de óleo (Tabela 4.10; Figura 4.8).

Com isso, foi possível estabelecer uma relação direta entre o acréscimo de óleo de Mamona e as variações das temperaturas de compactação e de usinagem das respectivas misturas asfálticas e, por consequência, dos agregados, obtidas como preconiza a Norma da AASHTO T-312 (Figura 4.9 à Figura 4.14).

Os resultados indicam que o acréscimo de óleo de Mamona tem influência preponderante na diminuição da viscosidade do CAP e, portanto, na diminuição das temperaturas de compactação e de usinagem das misturas asfálticas estudadas. Tal efeito proporcionou uma diminuição da temperatura de usinagem da mistura asfáltica (Norma da AASHTO T-312), em torno de 14°C para o maior teor de óleo de Mamona.

Em função disto, o teor ideal, e que resultará em um maior benefício em termos energéticos para a execução de uma mistura asfáltica contendo como aditivo o óleo de Mamona (Figura 4.15), só deverá ser definido a partir das análises das propriedades mecânicas das misturas asfálticas que contenham os teores de óleo em estudo.

O óleo de mamona possui em sua cadeia molecular uma estrutura apolar e outra polar. A parte Apolar, por conter a maior estrutura molecular, reage como um emulsificador, ou seja, como um sabonificador, levando a uma relação ao arranjo intermolecular entre as partes, promovendo uma cadeia extensa. A área superficial entre as fases aumenta para uma grande extensão e as propriedades da interface, como a aparência e a viscosidade, são importantes na determinação da facilidade de composição e de sua estabilidade.

O acréscimo da parte polar resulta no aumento da umidade e, em virtude do uso e aplicações em temperaturas elevadas, a evaporação da água produzida pelos arranjos das partes supracitadas pode gerar vazios na mistura, comprovando assim que o valor de adição do óleo é limitado. A hidroxila presente na estrutura Polar é responsável pela indução de umidade, ou seja, produz água, o que pode comprovar o fato de que o óleo de mamona a uma percentagem acima de 7 % não passar no ensaio de lottman modificado e diminuir o módulo resiliência, uma vez que os vazios aumentam.

Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios de viscosidade pelo viscosímetro de Brookfield.

VISCOSIDADE BROOKFIELD (D 4402 - ASTM)	TIPO DE LIGANTE																																			
	CAP PURO			S.B.S			CAP + 2% MAMONA			CAP + 3% MAMONA			CAP + 4% MAMONA			CAP + 5% MAMONA			CAP + 6% MAMONA			CAP + 7% MAMONA			CAP + 8% MAMONA			CAP + 9% MAMONA			CAP + 10% MAMONA					
TEMPERATURAS (°C)	135°C	155°C	177°C	135°C	155°C	177°C	135°C	155°C	177°C	135°C	155°C	177°C	135°C	155°C	177°C	135°C	155°C	177°C	135°C	155°C	177°C	135°C	155°C	177°C	135°C	155°C	177°C	135°C	155°C	177°C	135°C	155°C	177°C	135°C	155°C	177°C
VISCOSIDADES (Pa.s)	719	346,3	123	632,5	304	107,5	741	369	126,9	656,4	317	112,9	537,5	269	99	493,75	246	92,8	476,25	243,5	90,3	472,5	238,5	90,5	443,75	226	88,3	442,5	223	85,5	377,5	197	77,5			

Figura 4-10 – Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura para os CAPs estudados.

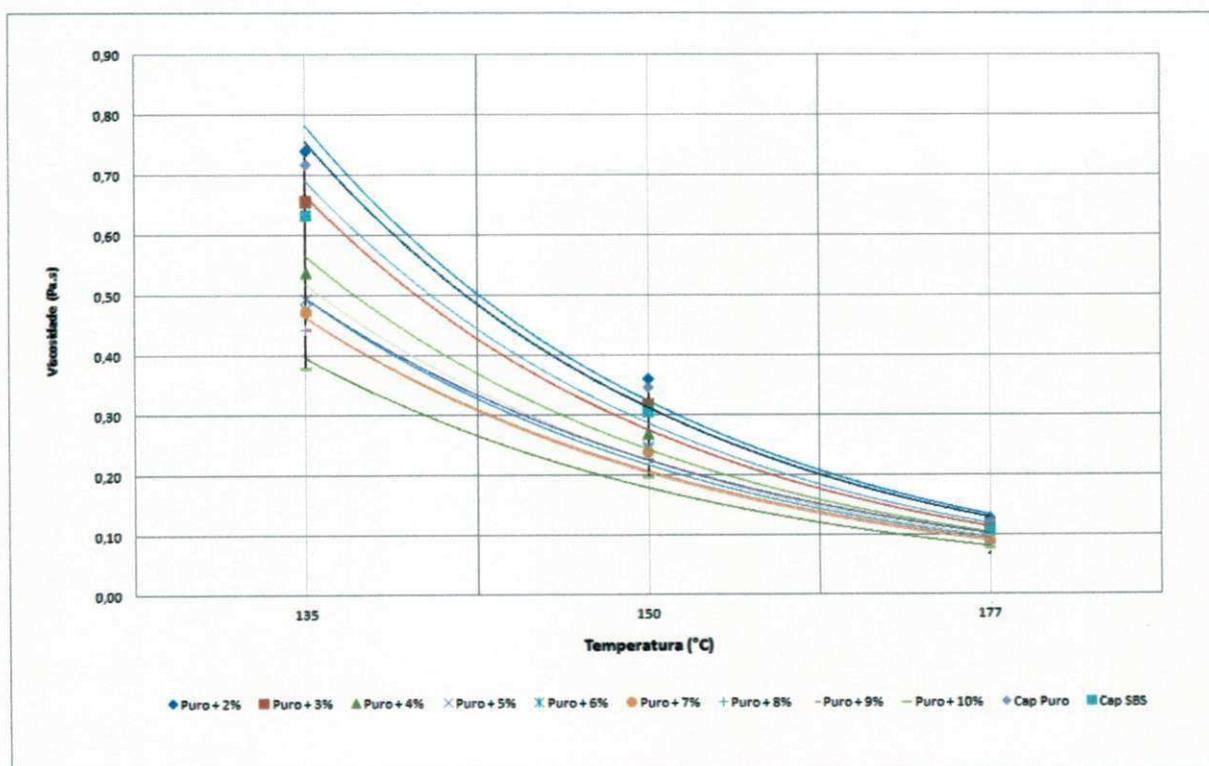


Figura 4-11 – Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura [CAP Puro].

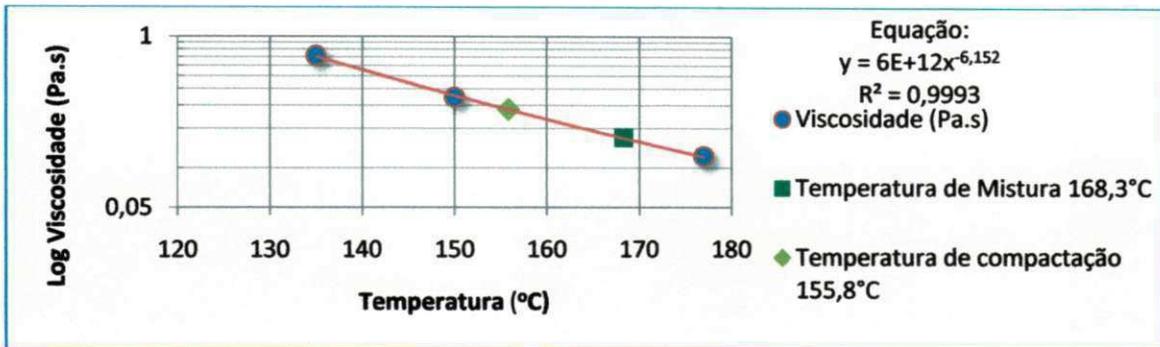


Figura 4-12 - Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura [CAP + SBS].

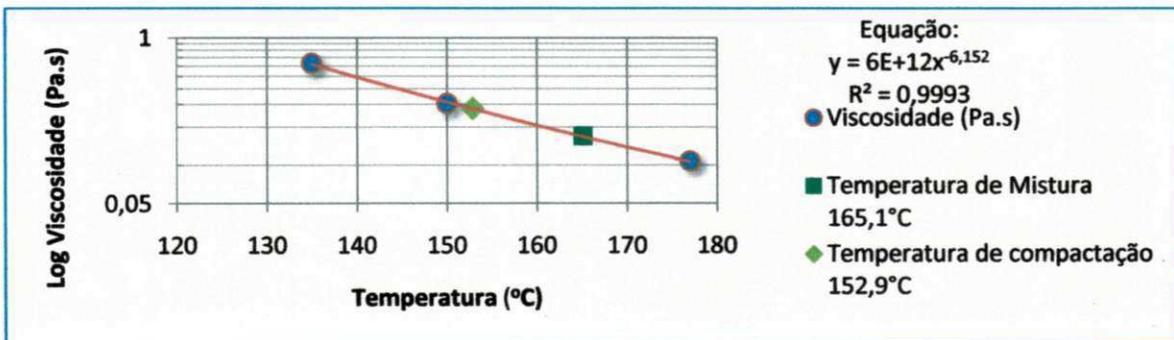


Figura 4-13 - Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura [CAP + 3% de óleo de Mamona].

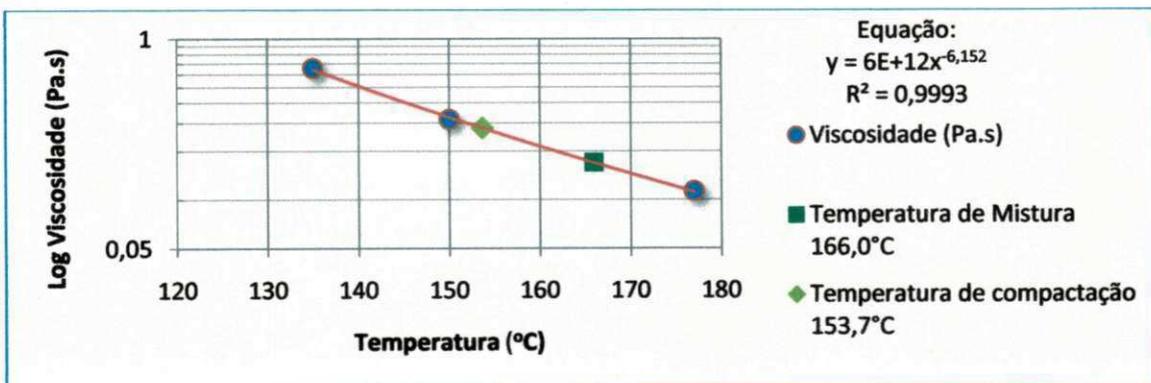


Figura 4-14 - Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura [CAP + 5% de óleo de Mamona].

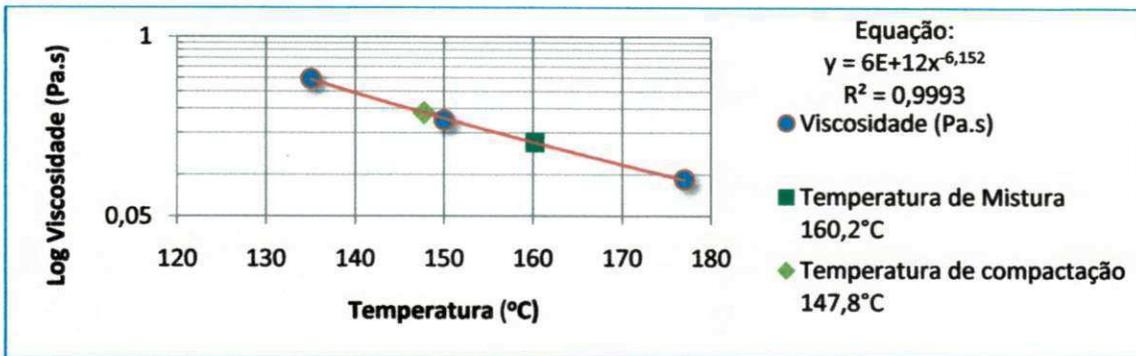


Figura 4-15 - Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura [CAP + 7% de óleo de Mamona].

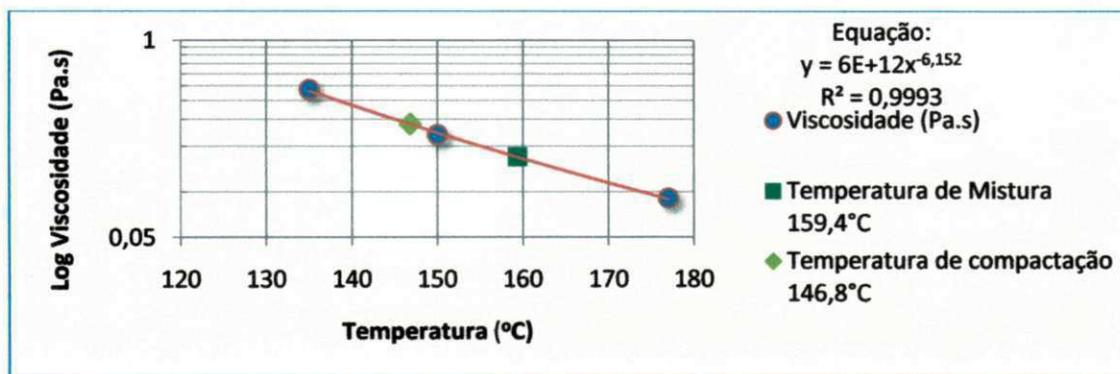


Figura 4-16 - Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura [CAP + 9% de óleo de Mamona].

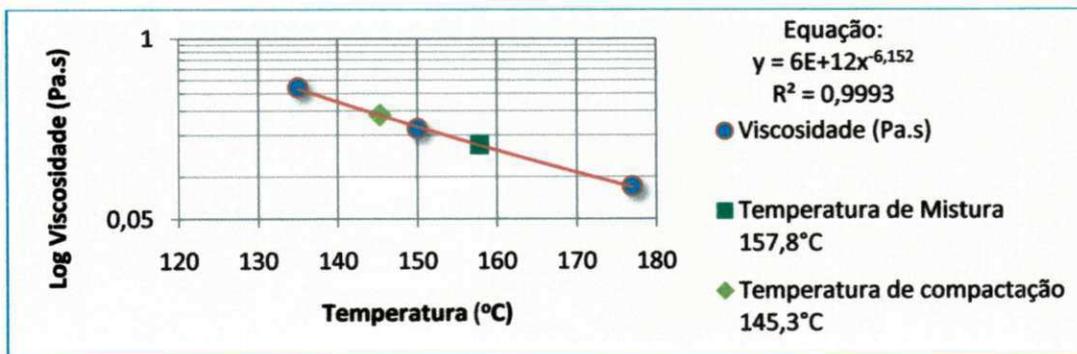
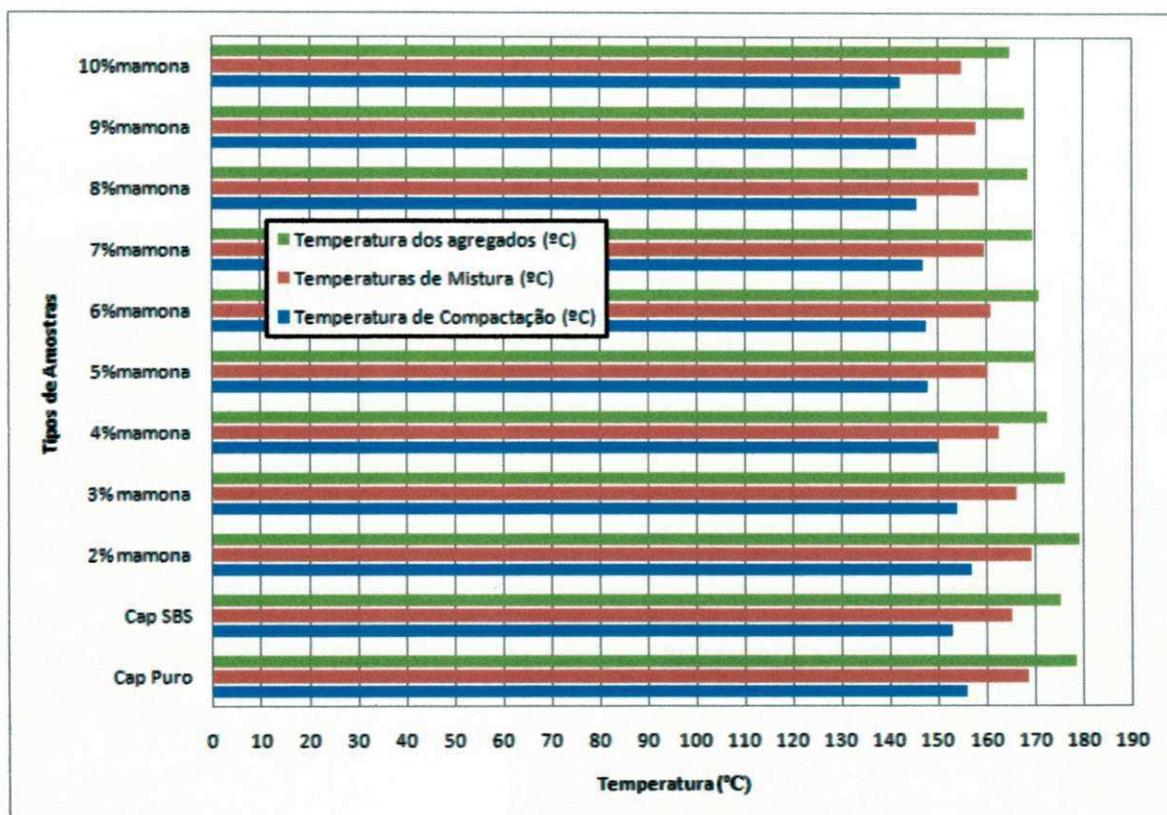


Figura 4-17 - Temperaturas de usinagem, de compactação e dos agregados utilizadas nesta pesquisa para compactação Superpave.



4.2 Dosagem das Misturas Asfálticas

A dosagem Superpave teve início com a adoção das composições granulométricas das três misturas (inferior, intermediária e superior), a partir destas proporções e dos tipos de agregados, os quais foram essenciais para a estimativa teórica do teor de ligante inicial, em função da Equação 7.

$$P_{li} = \left[\frac{G_l \cdot (V_{le} + V_{la})}{G_l \cdot (V_{le} + V_{la}) + M_{ag}} \right]$$

Equação 7

Onde:

M_{ag} = Massa de agregado (g);

G_l = Massa específica do ligante (g/cm^3);

P_l = teor de ligante (% em massa);

P_{ag} = percentual de agregado na mistura (% em massa);

P_{li} = teor de ligante inicial (% em massa);

V_{la} = volume de ligante absorvido (%);

V_{le} = volume de ligante efetivo (%).

O critério considerado para a parada na compactação dos corpos de prova por amassamento foi o número de giros como parâmetro relativo ao tráfego médio/alto, comum em avenidas de cidades de médio e grande porte e em rodovias estaduais e federais. Os valores do número de giros compreenderam em: 8 giros para $N_{inicial}$ (inicial), 100 giros para $N_{projeto}$ (projeto) e 160 giros para o $N_{máximo}$ (máximo).

Na Tabela 4,11, estão listados os teores de CAP iniciais para a *Primeira Fase da Dosagem*, bem como uma síntese dos resultados iniciais, os quais foram essenciais para a definição da curva de projeto (Curva Superior, Figura 4.6), a qual teve os parâmetros volumétricos mais próximos dos critérios Superpave de Dosagem.

Tabela 4.11 - Parâmetros volumétricos obtidos em função dos Teores de CAPs iniciais calculados.

Mistura Tentativa 1	Ligante Tentativa %	%Gmm $N_{inicial}$	%Gmm $N_{intermediário}$	%Gmm $N_{máximo}$	VAM (%)	Vv (%)	Filer/Asfalto
Inferior	5,2	86,66	96,77	97,33	15,28	3,23	0,81
Intermediária	5,3	89,68	96,70	98,64	15,07	3,30	1,12
Superior	4,5	89,95	96,42	97,55	14,36	3,58	1,13

Na *Segunda Fase da Dosagem* foi definida a mistura de trabalho com a escolha de um novo teor, de 4,2% CAP, a partir das massas específicas dos agregados, do CAP e do percentual de agregados na mistura (Equação 8).

$$P_{le,estimado} = -(P_{ag} \times G_1) \times \left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} \times G_{sb}} \right) + P_{l,estimado} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

G_{sb} = massa específica aparente da composição de agregados (g/cm^3);

G_{se} = massa específica efetiva da composição de agregado (g/cm^3);

G_l = massa específica do CAP (g/cm^3);

P_{ag} = percentual de agregados na mistura (% em massa).

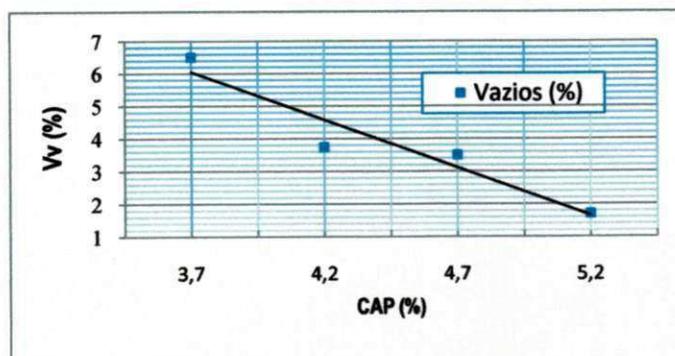
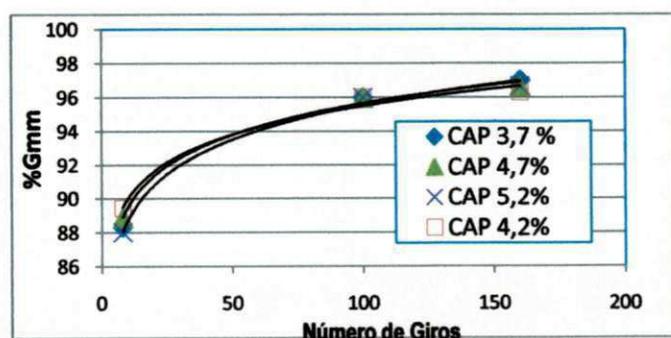
Nesta Fase foram compactados os corpos de prova (Curva Superior) com variação sobre teor referência de 4,2 % nas seguintes proporções: $\pm 0,5\%$ e $+1\%$, ou seja: 3,7%; 4,2%; 4,7% e 5,2%. Em função destes, foram moldados vinte e quatro (24) corpos de prova, sendo seis (6) para cada teor, respectivamente.

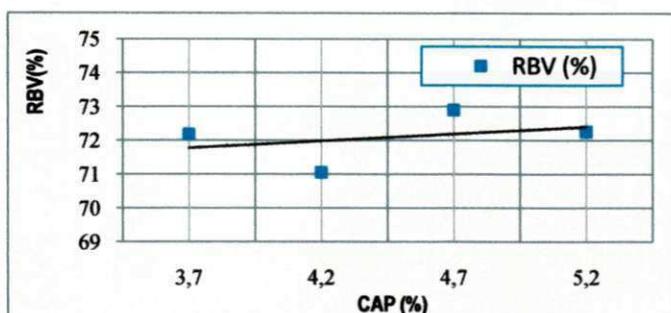
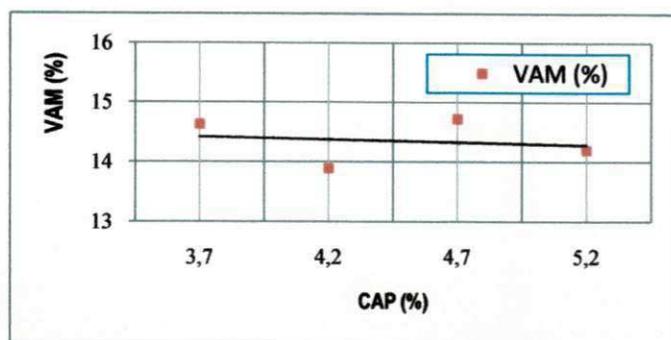
Na Tabela 4.12 são apresentados os resultados dos parâmetros volumétricos resultantes da *Segunda Fase da Dosagem*. Estes parâmetros estão lançados em gráficos em seqüência lógica, a qual permitiu a definição do teor de projeto, o qual foi usado na composição das misturas para a avaliação das propriedades mecânicas a partir do ensaios de: Resistência à Tração por Compressão Dametral, de Lottman Modificado e de Módulo de Resiliência.

Tabela 4.12 – Resultados dos parâmetros da Dosagem Superpave para as misturas com os teores de CAP estimados.

CAP (%)	%Gmm @ $N_{inicial}$ (N=8)	%Gmm @ $N_{projeto}$ (N=100)	%Gmm @ N_{maximo} (N=160)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	Filer/Asfalto	Massa específica (g/cm ³)
3,7	88,35	96	97	6,50	14,63	72,18	1,04	2,32
4,2	89,44	96	96,3	3,74	13,89	71,05	1,20	2,36
4,7	88,88	96	96,67	3,50	14,72	72,9	1,08	2,34
5,2	88,03	96	96,67	1,70	14,2	72,26	1,14	2,37

Figura 4-18 – Parâmetros da Dosagem Superpave para as misturas com os teores de CAP estimados.



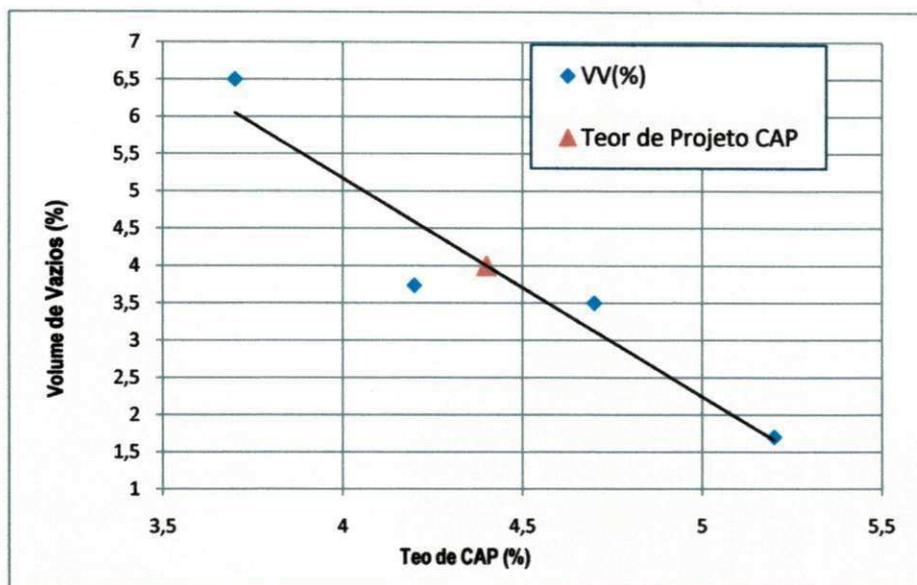


Visto que o volume de vazios para os teores estimados ainda não atendia aos quatro por cento (4%) de vazios predefinidos pela Dosagem Superpave, a partir da curva volume de Vazios em função do Teor de CAP (Figura 4.17), foi estimado um novo teor (4,4%) que atendesse a este critério, e novamente foram moldados seis (6) corpos de prova para a verificação das propriedades volumétricas da mistura compactada. Na Tabela 4.13 encontram-se os parâmetros volumétricos inerentes ao teor de 4,4%, que atendeu os critérios supracitados da Dosagem Superpave.

Tabela 4.13 - Parâmetros da Dosagem Superpave para a mistura com o teor de CAP de 4,4%.

CAP (%)	%Gmm @ $N_{inicial}$ (N=8)	%Gmm @ $N_{projeto}$ (N=100)	%Gmm @ $N_{máximo}$ (N=160)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	Filer/Asfalto	Massa específica (g/cm ³)
-	< 89	Igual 96	< 98	4	> 13	65 - 75	0,6 - 1,2	-
4,4	88,48	96	97,6	3,99	14,74	72,87	1,11	2,33

Figura 4-19 – Estimativa do teor de CAP de Projeto [Teor Ótimo de Projeto]



4.3 Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas.

Os resultados obtidos com o auxílio dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral Indireta, de avaliação ao dano por Umidade Induzida – “*Lottman Modificado*”, e de Módulo de Resiliência foram utilizados para mensurar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas compostas com diferentes teores de óleo de Mamona, mistura padrão com CAP Puro e com SBS. Estes resultados, por sua vez, permitiram inferir qual seria o teor de óleo de Mamona que atenderia ao critério de “Resistência Mecânica”. A seguir, serão apresentados, em seqüência, os resultados obtidos para cada ensaio.

Resistência à Tração por Compressão Diametral Indireta

Na Tabela 4.14 e na Figura 4.19 estão apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral Indireta para cada corpo de prova moldado com o teor de CAP de Projeto (4,4%), obtido pelo procedimento da compactação Superpave para a Faixa C em estudo.

É possível observar que os Valores de RT são inversamente proporcionais ao acréscimo do teor de óleo de Mamona. Entretanto, os resultados indicam que há um limite para o qual a Resistência à Tração é compatível com a obtida para a mistura composta de CAP puro. Os dados indicam que o teor limite, relacionado à RT, seria de 5%. Apesar do teor

de 3% ter proporcionado à mistura asfáltica uma RT maior, a mistura asfáltica com 5% resultou numa diminuição de temperatura de usinagem e de compactação maior, quando comparada à mistura pura (Figura 4.18 e Tabela 4.14).

Cabe ressaltar que, normalmente, as misturas com proporções mais acentuadas de finos, curvas próximas ao limite superior da Faixa Granulométrica - a curva utilizada neste estudo, tem um incremento menor da RT. Entretanto, o efeito da compactação por amassamento faz com que o valor médio da RT atenda ao limite mínimo preconizado pela Norma do DNIT ES031 (2006), que deve ser de, no mínimo, 0,65 MPa (a 25°C) em concretos asfálticos destinados a camadas de rolamento.

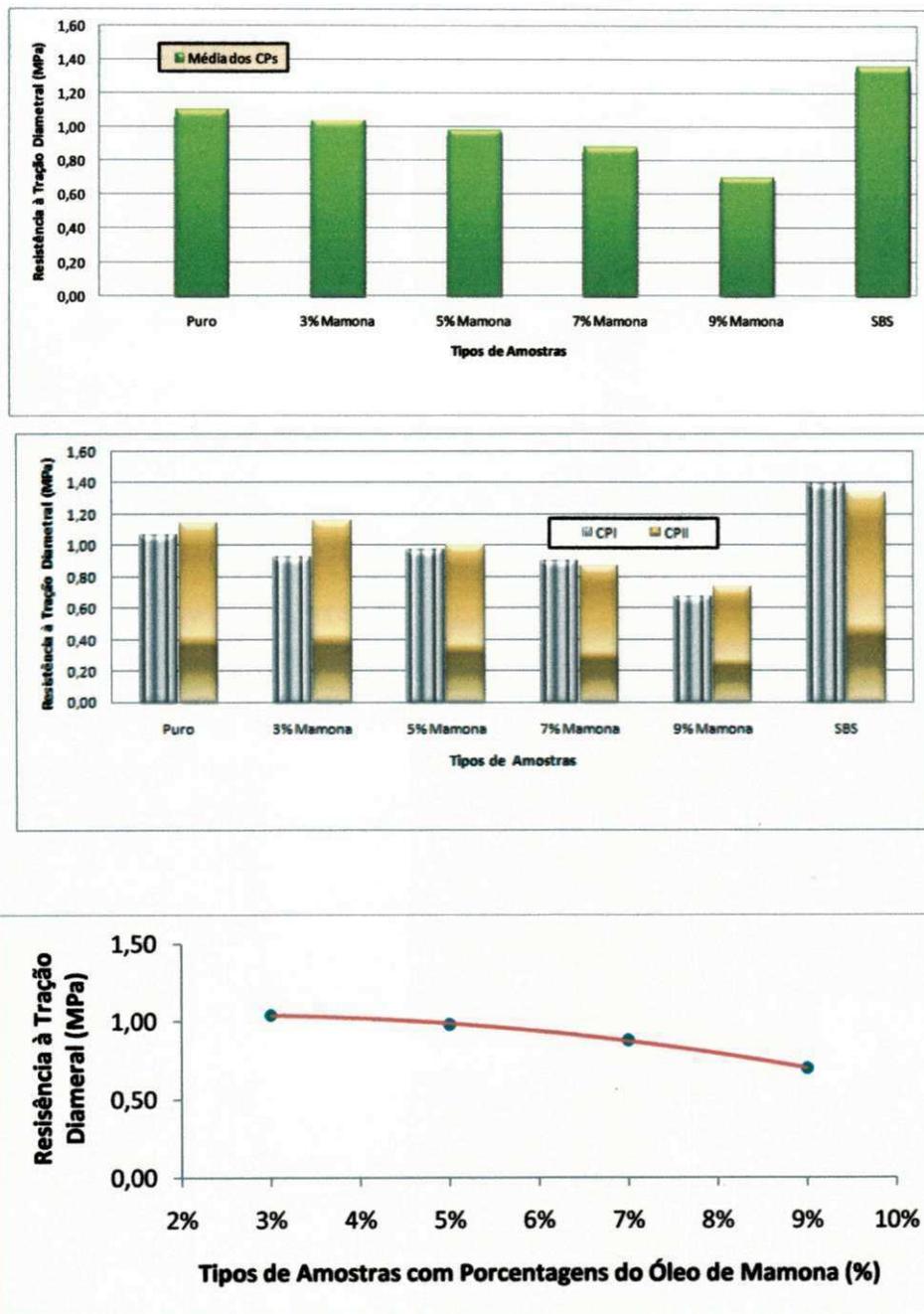
Motta (2009) menciona que o controle de temperatura de moldagem pode levar a uma diferença significativa de volume de vazios das misturas e ter impacto sobre a RT, promovendo assim uma variação de seus valores.

Neste estudo, não foram observadas variações significativas entre os valores de RT obtidos a partir de dois corpos de prova moldados para um mesmo teor de CAP e de óleo de Mamona, mesmo com a redução da temperatura de compactação e de mistura (Tabela 4.14).

Tabela 4.14 – Resistência à Tração Diametral

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIAMETRAL (ME 136/2010 DO DNIT)	TIPO DE AMOSTRA											
	CAP PURO		SBS		CAP + 3% MAMONA		CAP + 5% MAMONA		CAP + 7% MAMONA		CAP + 9% MAMONA	
	CP I	CPII	CP I	CPII	CP I	CPII	CP I	CPII	CP I	CPII	CP I	CPII
RESULTADO MPa (°C)	1.06	1.14	1.39	1.34	0.92	1.15	0.96	1.00	0.90	0.86	0.67	0.73
MÉDIA (MPa)	1.10		1.36		1.04		0.98		0.88		0.70	

Figura 4.20 - Resistência à Tração Diametral em Barras [Valores Médios e Valores Individuais, respectivamente].



Resistência ao Dano pela Umidade Induzida de Misturas Betuminosas – LOTTMAN

Na Tabela 4.15 e na Figura 4.19 estão apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios de resistência ao dano por umidade induzida (RRT), para cada corpo de prova e as suas médias, respectivamente, moldados nos teores de CAP de projeto, pelo procedimento da compactação Superpave para a Faixa C, curva Granulométrica Superior.

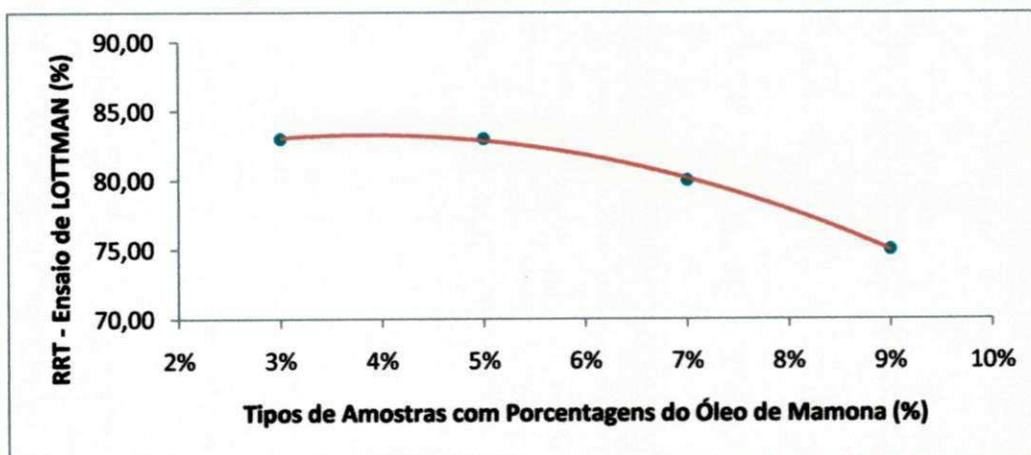
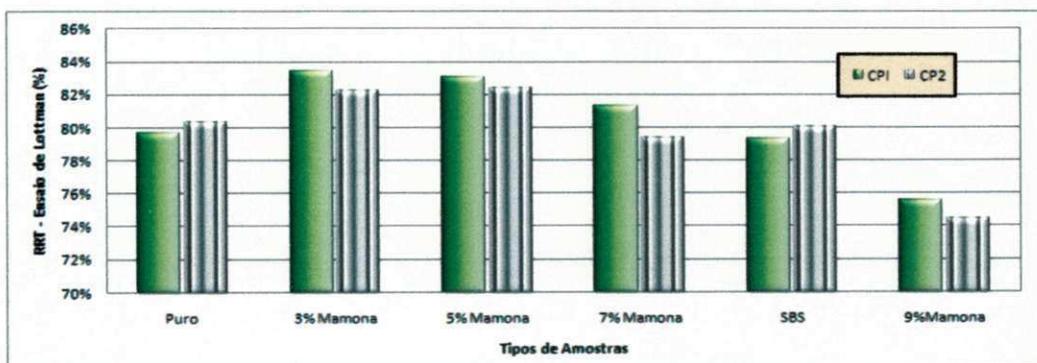
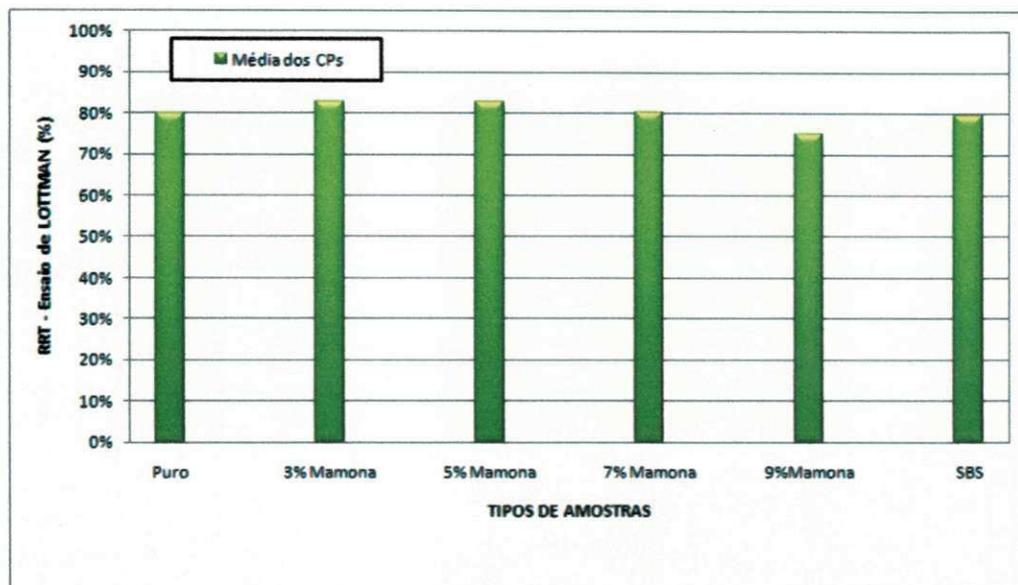
É possível observar que os Valores de RRT das misturas estudadas sofrem uma influência do acréscimo do teor de óleo de Mamona. Os resultados indicam que, com exceção da mistura composta com o teor de 9% de óleo de Mamona, os valores de RRT são satisfatórios, quando comparados aos valores critérios pré-estabelecidos pela AASHTO (RRT > 80% - T 283-02).

Novamente, a mistura asfáltica com o teor de 5% resultou numa diminuição de temperatura de usinagem e de compactação maior, quando comparado à mistura pura, e atendeu ao critério da AASHTO para RRT (Figura 4,19 e Tabela 4,15).

Tabela 4.15 - Resultados dos corpos de provas quanto ao ensaio de Lottman Modificado.

ENSAIO LOTTMAN MODIFICADO (T 283 - 02 DA AASHTO)	TIPO DE AMOSTRA											
	CAP PURO		SBS		CAP + 3% MAMONA		CAP + 5% MAMONA		CAP + 7% MAMONA		CAP + 9% MAMONA	
	CP I	CP II	CP I	CP II	CP I	CP II	CP I	CP II	CP I	CP II	CP I	CP II
RESULTADO MPa (°C)	80	80	79	80	83	82	83	82	81	79	76	74
MÉDIA	80		80		83		83		80		75	

Figura 4-21 – RRT em barras, dos corpos de prova quanto ao ensaio de Lottman Modificado



Ensaio de Módulo de Resiliência

Na Tabela 4.16 e na Figura 4.20 estão apresentados, respectivamente, os resultados obtidos a partir dos ensaios de Módulo de Resiliência (Modulo Total - MR), cada corpo de prova e as suas médias, moldados nos teores de CAP de projeto pelo procedimento da compactação Superpave para a Faixa C, curva Granulométrica Superior.

De acordo com BERNUCCI et al. (2007), os valores típicos de misturas asfálticas a 25°C estão situados na faixa de 2.000 a 8.000 MPa. Os valores encontrados para as misturas asfálticas estão dentro do intervalo citado. Segundo Silva (apud DAVID, 2011), a análise do Módulo de Resiliência não pode ser feita de forma direta, uma vez que ele está relacionado à rigidez da mistura. Valores maiores ou menores podem ser aceitos, dependendo da estrutura do pavimento, devendo ser considerada a compatibilidade de deformações entre as camadas que o constituem, principalmente a camada de base.

É possível, ainda, observar que os Valores MR das misturas estudadas sofrem uma influência ao acréscimo do teor de óleo de Mamona. Os resultados indicam que, com exceção da mistura composta com o teor de 9% de óleo de Mamona, os valores de MR das misturas restantes são satisfatórios, quando comparados aos valores usualmente obtidos para as misturas asfálticas convencionais (BERNUCCI et al. 2007).

Novamente, a mistura asfáltica com o teor de 5% resultou numa diminuição de temperatura de usinagem e de compactação maior, quando comparado à mistura pura, e apresentou um módulo superior à mistura padrão, para a qual foi utilizado o CAP Puro.

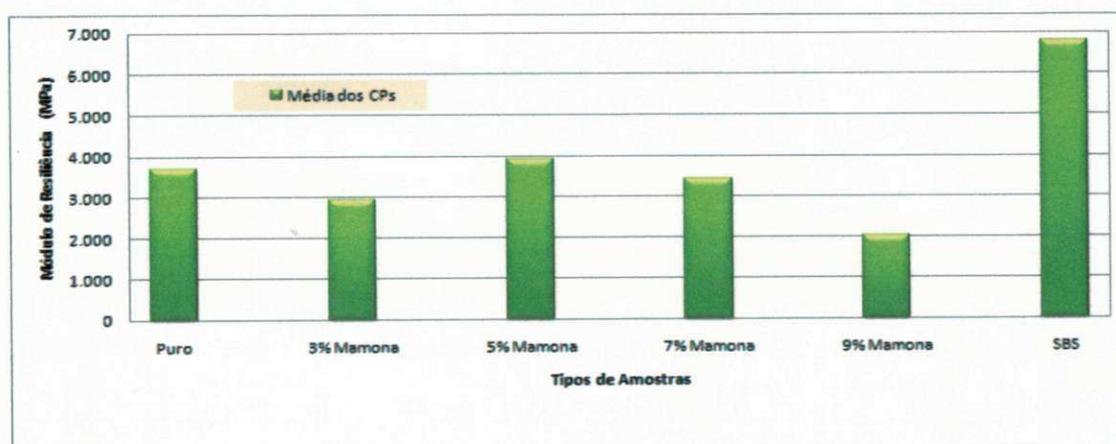
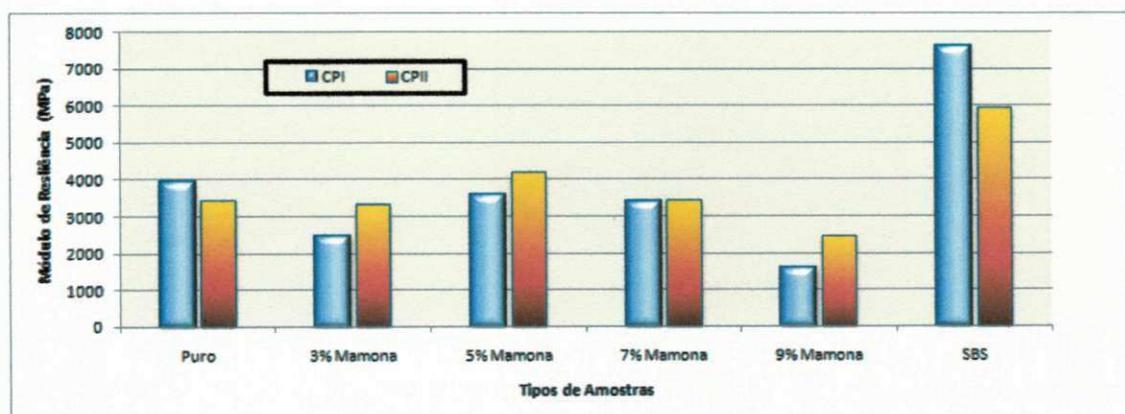
Afirmar que, quanto maior o valor do Módulo de Resiliência, melhor o desempenho da mistura asfáltica, pode não ser verdadeiro. As misturas asfálticas devem possuir resistência à ruptura por carregamento estático e “flexibilidade” suficiente para suportar as solicitações do tráfego, e boa resistência à tração para evitar rupturas prematuras. Para Balbo (2007), a relação entre o valor de módulo de resiliência e a resistência à tração do material tem sido empregada simultaneamente em projetos de dosagens de misturas asfálticas.

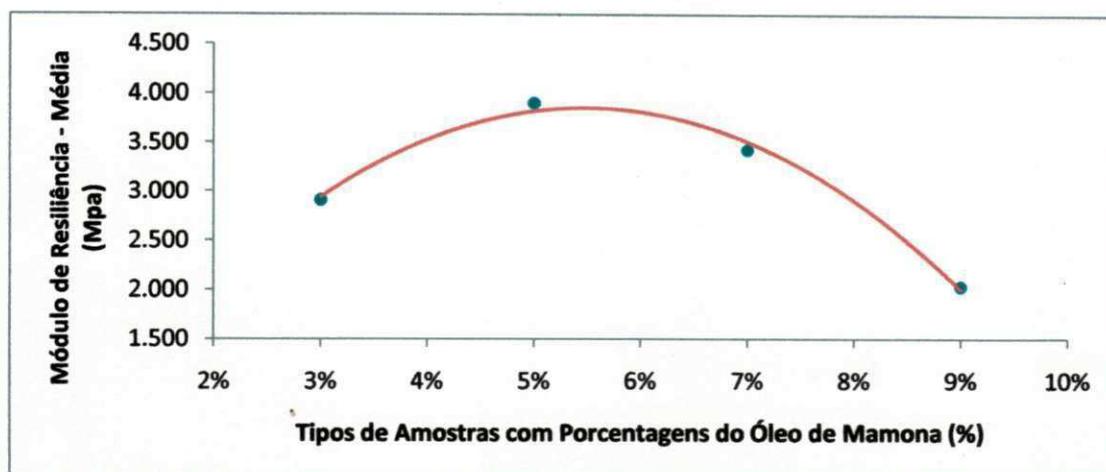
Segundo Vasconcelos (2004), alguns pesquisadores acreditam que quanto menor a relação MR/RT, maior será a vida de fadiga obtida pela mistura. Além disso, foi observado, a partir da análise dessa relação, que misturas com distribuição granulométrica enquadrada na Faixa C do DNIT tendem a apresentar uma menor vida de fadiga.

Tabela 4.16 – Módulos de Resiliência [Valores Valores Individuais e Médios, respectivamente]

MÓDULO DE RESILIÊNCIA (D4123 - 82 DA ASTM)	TIPO DE AMOSTRAS											
	CAP PURO		S.B.S		CAP + 3% MAMONA		CAP + 5% MAMONA		CAP + 7% MAMONA		CAP + 9% MAMONA	
	CP I	CPII	CP I	CPII	CP I	CPII	CP I	CPII	CP I	CPII	CP I	CPII
RESULTADO MPa (°C)	3.934	3.455	7.606	5.939	2.466	3.354	3.574	4.230	3.396	3.449	1.580	2.484
MÉDIA (MPa)	3.694		6.773		2.910		3.902		3.423		2.032	

Figura 4.22 – Módulos de Resiliência em Barras [Valores Valores Individuais e Médios, respectivamente]





Os valores de MR e RT obtidos para as misturas asfálticas avaliadas são muito próximos aos observados para CBUQs produzidos com ligante convencional (da ordem de 4.000 MPa e 1 MPa, respectivamente), portanto, considerando o desempenho mecânico das amostras, é correto concluir que a técnica empregada é adequada para a produção de misturas asfálticas a temperaturas intermediárias.

Cabe ressaltar a importância da verificação da adesividade do ligante ao agregado pétreo, que pode ter sido reduzida devido à adição do agregado miúdo umedecido. Esta característica foi avaliada empregando a metodologia Lottman Modificada.

4.3.1 Considerações finais

Observando as informações contidas na Tabela 4.17, é possível inferir que o teor de 5% de óleo de Mamona, adicionado à mistura asfáltica com 4,4% de CAP, resultou, para os corpos de prova submetidos aos ensaios, em propriedades volumétricas e mecânicas satisfatórias em relação aos critérios preconizados pelas normas adotadas. A mistura com este teor, quando comparada com as misturas de referência (CAP Puro e o CAP modificado com o SBS), teve desempenho satisfatório e, em seu favor, a diminuição da temperatura em aproximadamente oito graus centígrados (8,0°C).

Tabela 4.17 – Resumo das propriedades volumétrica e mecânicas das misturas asfálticas estudadas
[CAP Puro; CAP + SBS, e CAP + 5% de óleo de Mamona]

Mistura	Teor de CAP	Vv,%	VAM,%	RBV,%	P/A	RT (MPa)	RRT (%)	MR (MPa)
CAP PURO	4,4	3,99	14,74	72,87	1,11	1,10	80	3.694
SBS	4,4	4,10	14,83	73,02	1,10	1,36	80	6.773
5 % Mamona	4,4	3,96	14,71	72,82	1,11	0,98	83	3.902

Segundo a estimativa realizada por engenheiros presentes e atuantes em usinas de asfalto da ATECEL - Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Junior, se definiu uma percentagem econômica do óleo BPF por hora, tanto para o CAP, quanto para os Agregados. Para o Cimento Asfáltico Petróleo, são utilizados, normalmente, trinta (30) litros por hora de óleo BPF para alimentar um reservatório mais conhecido como “jumbo”, contendo trinta e duas (32) toneladas de CAP, e para a variação de temperatura desejada (8,0°C) estimou-se uma redução de vinte por cento (20%) da aplicação do óleo BPF. Já para os Agregados, utilizam-se 6 litros por hora do óleo BPF para a queima e o aquecimento, e estimou-se uma economia de 10% do uso deste mesmo óleo para a mesma redução de temperatura. Para fins de mistura por tonelada produzida, estimou-se uma economia de 10% do óleo BPF por tonelada de mistura produzida.

Considerando o valor de mercado do óleo BPF, um real por litro (R\$1,00/l), para a produção anual e venda de asfalto em 2010 pela Petrobrás no Brasil, de 3.000.000 de toneladas de asfalto, se tem uma economia de 6.750.000 litros para o aquecimento do CAP, e 52.145.454,56 litros para o aquecimento e a queima dos agregados, resultando em uma economia total de óleo BPF de 58.895.454,56 litros para cada 555.204.545,60 litros utilizados para a mistura com o CAP convencional, contabilizando assim uma economia de 9,4% na quantidade de litros de óleo BPF, devido à adição do óleo de Mamona, para aquecimento dos materiais.

Em posse destes dados, afirma-se que, além de reduzir a temperatura de usinagem e compactação de misturas asfálticas, o óleo de mamona, quando adicionado ao CAP, proporciona um melhor manuseio da matéria prima, e espera-se um aumento quanto à resistência à fadiga e o tempo de envelhecimento, bem como a diminuição dos riscos quanto à segurança, trabalhabilidade dos operários e a possibilidade de oxidação do CAP na mistura.

Tabela 4.18 – Valores da quantidade de óleo BPF para aquecimento do CAP

TIPO DE CAP	ÓLEO BPF/TEMPO	
	Uso de óleo BPF/DIA (l/DIA) para 32 toneladas	Uso de óleo BPF/3 MILHÕES TONELADAS utilizados em 2010 (l/3000000 ton)
CAP PURO 50/70	360	33.750.000,00
CAP+ ÓLEO DE MAMONA	288	27.000.000,00
ECONOMIA	72	6.750.000,00

Tabela 4.19 – Valores da quantidade de óleo BPF para aquecimento dos agregados

AGREGADOS	ÓLEO BPF/TEMPO	
	Uso de óleo BPF/DIA (l/dia) para 9 toneladas	Uso de óleo BPF/65.181.818,20 MILHÕES TONELADAS utilizados em 2010 (l/65181818,20 ton)
CAP PURO 50/70	72	521.454.545,60
CAP+ ÓLEO DE MAMONA	64,8	469.309.091,00
ECONOMIA	7,2	52.145.454,60

Tabela 4.20 – Valores da quantidade de óleo BPF para Mistura

TIPO DE MISTURA	ÓLEO BPF/TEMPO	
	Uso de óleo BPF/DIA (l/DIA)	Uso de óleo BPF/ MILHÕES TONELADAS de mistura utilizados em 2010
CAP PURO 50/70	432	555.204.545,60
CAP+ ÓLEO DE MAMONA	352,8	496.309.091,00
ECONOMIA	79,2	58.895.454,60

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA AS FUTURAS PESQUISAS

5.1 Conclusões

Pode-se inferir, a partir deste experimento e da fundamentação teórica, que:

Para o ponto de amolecimento e da Viscosidade Brookfield, a adição do óleo levou a resultados de temperaturas inferiores ao CAP puro 50/70. Este resultado é positivo para a validação do uso da técnica de experimentos com misturas, para delineamento de experimento e modelagem de propriedades reológicas para estudos de CAP modificados, pois a diminuição linear das temperaturas de especificação nas temperaturas de ocorrência de deformação permanente, e o envelhecimento em curto prazo não afetam a intensidade do efeito do óleo em reduzir a temperatura de especificação para estas faixas de temperaturas.

Nas temperaturas de usinagem e de compactação, o óleo de Mamona reduziu a viscosidade do CAP, o que reflete em melhoria da trabalhabilidade das misturas asfálticas, garantido assim, um teor especificado de adição deste óleo sobre as propriedades mecânicas das misturas asfálticas. É possível elevar o Módulo de Resiliência, garantindo mais uma característica deste aditivo como um extensor, e mantendo o desempenho da mistura quanto às propriedades mecânicas do revestimento asfáltico. Para altos teores desta adição, algumas propriedades mostram que o efeito do óleo é pouco expressivo, e até mesmo nocivo, existindo o teor ideal para tal mistura.

Para a obtenção de uma mistura asfáltica com propriedades mecânicas satisfatórias, é essencial considerar as propriedades físicas, mecânicas e de estado (volumetria), as quais estão diretamente relacionadas à distribuição granulométrica dos materiais que constituem a mistura, o processo de compactação e a condição do CAP utilizado (com aditivo ou sem aditivo).

No que se refere à avaliação das propriedades mecânicas, o Módulo de Resiliência, a Resistência à Tração, e a verificação do dano por umidade induzida (Lottman), são parâmetros essenciais ao processo de dosagem de misturas asfálticas.

O baixo teor de Asfalto é justificado pela metodologia de compactação escolhida, uma vez que esta é a mais semelhante à realizada em campo, além dos seus critérios para a

composição da mistura ideal, que comprovam sim o atendimento das propriedades mecânicas más, com valores bem abaixo de uma mistura convencional. Esta característica tornou-se fato promissor, já que a adição do óleo de mamona proporciona à mistura uma melhor trabalhabilidade e, conseqüentemente, na redução da temperatura e na economia dos custos efetivos para a produção e a execução da mistura na pista.

Em síntese, podemos inferir que a redução de aproximadamente 8,1°C nos processos de usinagem e compactação da mistura asfáltica, devido à adição de 5% de óleo de mamona, o que proporcionou uma mistura em termos volumétricos e mecânicos satisfatória, faz indicar que *“o óleo de mamona” se mostra como um aditivo promissor para as misturas asfálticas usinadas à quente*”.

5.2 Sugestões para as futuras pesquisas

Com a finalidade de melhorar e dar continuidade e aprofundamento ao objeto desta pesquisa, são sugeridos os seguintes estudos:

- ✓ Efetuar uma análise comparativa entre o aditivo óleo de mamona e outros aditivos sobre as dosagens de misturas asfálticas, utilizando as metodologias Marshall e Superpave.
- ✓ Estudar outras faixas granulométricas para misturas asfálticas, para a verificação das propriedades volumétricas e mecânicas com o aditivo óleo de mamona.
- ✓ Realizar ensaios de “*Módulo Dinâmico*”, de “*Creep dinâmico*” e de Fadiga para uma previsão de deformação permanente das misturas asfálticas com aditivo óleo de mamona.
- ✓ Efetuar uma nova composição de mistura deste óleo com o CAP+SBS, e o mesmo óleo + pó de Borracha e verificar a previsão de um melhoramento quanto ao envelhecimento, fadiga e outras propriedades mecânicas.
- ✓ Efetuar um estudo sobre a iteração química entre os materiais adotados na pesquisa, especificamente entre o CAP e óleo de mamona.

- ✓ Realizar estudos das projeções reológicas do CAP adicionado com óleo de Mamona, através do Reômetro de cisalhamento dinâmico.

- ✓ Realizar um estudo de viabilidade econômica e comparativa entre os aditivos orgânicos já existentes no mercado e o óleo utilizado nesta pesquisa.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO: AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T-283: Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage. Washington, USA, 1989.

AASHTO: AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T-312: *Preparing and Determining of Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of The Superpave Giratory Compactor - 2010*

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

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.

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 corpos de prova de Concreto Asfáltico*. 35ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

ALDIGUERI, D.R.; SILVEIRA, M.A.; SOARES, J.B. (2001) *Estudo Comparativo entre Compactação Manual e Automática de Misturas Asfálticas*. 33ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Florianópolis, v.I, p; 2001.

AMARAL, S.C., *Estudos de Misturas Asfálticas Densas com Agregados do Estado do Pará, Utilizando Asfalto Convencional (CAP-40) e Asfalto Modificado Com Polímero SBS (Betuflex B 65/60)*. Dissertação de Mestrado, USP: Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos – SP, 2000.

ANP – AGENCIA NACIONAL DE PETROLEO, GAS NATURAL E BIOCOMBUSTIVEIS. *Resolução ANP n° 19, de 11 jul. 2005. Estabelece as especificações dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP)*. Brasília: Diário Oficial da União, publicada em 12 jul. 2005, republicada em 13 jul. 2005, retificada em 25 jul. 2005 e 17 mar. 2006. _____. *Resolução ANP n° 39, de 24.12.2008*. Brasília: Diário Oficial da União, 2008.

ASSOCIATION MONDIALE DE LA ROUTE (AIPCR). *Emploi des liants bitumineux modifiés, des bitumes spéciaux et des bitumes avec additifs em techniques routières*. Guide Technique. september, 1999, La Défense, France

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 (2011) *D6925-08 Standard Test Method for Preparation and Determinations of The Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) specimens by Means of The Superpave Giratory Compactor - 2011.*

ASTM: American Society for Testing and Materials. ASTM D4123-82(1995): Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures.m Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.

AZARI, H.; Mc CUEN, R. H.; STUART, K. D., *Optimum compaction temperature for modified binders. Journal of Transportation Engineering*, V.129, nº 5, p. 531- 537, September/October, 2003.

BAHIA, H.U.; HISLOP, W.P.; ZHAI, H.; RANGEL, A. *Classification of Asphalt Binders Into Simple and Complex Binders, Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists*. 1998, p. 01-41

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

BARTHEL, W., MARCHAND, J.-P., von DEVIVERE, M. (2004) *Warm Asphalt Mixes by Adding a Synthetic Zeolite*. 3th Eurasphalt & Eurobitume Congress. Vienna. Paper 354.

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.

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.

BROWN, E.R. AND BROWNFIELD, J.R., *Investigation of Rutting and Segregation of Asphalt Mixtures in the State of Georgia*. Georgia Department of Transportation, 1989.

CARVALHO, L.O. de; *Cultura da mamoneira (Ricinus communis L.)*. São Paulo: CATI, 1991, p. 17 FOL3650

CERATTI; J. A. P.; PROJETO DE PESQUISA CONCEPA – LAPAV: *Estudo laboratorial de redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas*. ESTUDO DE MISTURAS ASFALTICAS “MORNAS” Porto Alegre; dezembro de 2007.

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.

CHARANIA, E.; CANO, J. H.; SCHNORMEIER, R. H. *Twenty Year Study of Asphalt Rubber Pavements in Phoenix, Arizona*. Transportation Research Record 1307, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C, 1991.

CHIERICE, G.O.; CLARO NETO, S. Aplicação industrial do óleo. In: AZEVEDO, D.M.P. de; LIMA, E.F. (eds. Tec.). *O agronegócio da mamona no Brasil*. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 2001. p. 89-120..

CLINE T.R.; LI, X; MARASTEANU, M.O.; SKOK, E.L. Dynamic and Resilient Modulus of MN/DOT Asphalt Mixtures, Department of Civil Engineering – University of Minnesota, 2003.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, (2012) Mamona. Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: Fevereiro de 2012.

COSTA, H. M. da.; RAMOS, V. D.; ABRANTES, T. A. S. A.; CASTRO, L. L. Y.; VISCONTE, L. L. Y.; NUNES, R. C. R.; FURTADO, C. R. G. Polímeros: Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, v. 14, n.1, p. 46-50, 2004.

COSTA, T. L. *Propriedades físicas e físico-químicas do óleo de duas cultivares de mamona*. Campina Grande. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Recursos Naturais. Costa 2006

COUTINHO N.,B., *Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas*. 304 p. Tese (doutorado): Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

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 083/98. Agregados – Análise Granulométrica . 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, ME 035/98. Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles. Rio de janeiro, 1998.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 084/95. Agregado miúdo – Determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 131/2010. Determinação do Ponto de Amolecimento- método Anel e Bola. Rio de Janeiro, 1998.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 155/2010. Determinação da Penetração . Rio de Janeiro, 1998.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 135/2010. Determinação do Módulo de Resiliência . Rio de Janeiro, 1998.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 136/2010. Misturas betuminosas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. 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.

FALCÃO, M.F.B. e SOARES, J.B., *Discussão Sobre os Modos de Ruptura Observados no Ensaio de Compressão Diametral*. In XVI Encontro de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás- IBP. Rio de Janeiro, 2002.

FREIRE, R. M. M. Ricinoquímica. In: AZEVEDO, D.M.P. de; LIMA, E.F. *O agronegócio da mamona no Brasil*. Comunicação para transferência de tecnologia, p. 295-335, 2006.

HICKS ,R. G.; SANTUCCI, L; ASCHENBRENER, T., Introduction and Seminar Objectives., In: Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements. Anais. San Diego, Transportation Research Board, California, Estados Unidos, 2003.

HICKS, R. G., Moisture damage in asphalt concret. TRB – Transportation Research Board, 1991.

HURLEY, G. C.; PROWELL, B. D. Evaluation of potential processes for use in warm mix asphalt. In: Association of Asphalt Paving Technologists Annual Meeting, 81., Savannah, 2006. Annual Meeting and Technical Sessions. Savannah: AAPT, V.75, 2006. CD ROM.

IBP: Instituto Brasileiro de Petróleo. Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos. IBP/Comissão de Asfalto. 6ª ed. rev. Rio de Janeiro,1999.

INSTITUTO DO ASFALTO, *Manual de Asfalto*. LEXINTON, KY E.U.A., 1989, rev. 2002, editora Petrobras, Brasil.

KHANAL, P. P.; MAMLOUK M. S., *Tensile Versus Compressive Moduli of Asphalt Concrete*. Transportation Research Record, 1995.

LARSEN, O.R., MOEN, Ø., ROBERTUS, C., KOENDERS, B.G. (2004) *WAM Foam Asphalt Production at Lower Operating Temperatures as an Environmental Friendly Alternative to HMA*. 3th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, Paper 137.

LEE,K.W; BRAYTON,T.E.; VEYERA,G.;HUFFMAN,J.; HARRINGTON,J., 2001, *Modified Superpave Mix Design for Cold in Place Recycling Asphalt Mixtures*, 2 nd

International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Auburn Alabama, USA;2001.

LEITE, L.F.M. *Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros*. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros): Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

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.

LIMA, C.S.; TOMÉ, L.G.A.; SANT'ANA, H.B.; SOARES, J.B.; SOARES, S. A. *Estudo do comportamento reológico por meio de curvas mestres dos ligantes asfalto-borracha*. 19º Encontro de Asfalto, IBP, 9 a 11 junho, RJ, 2008.

LIMA, F.C. DE A.A., *Resíduo Proveniente do Corte de Rochas ornamentais: uma Alternativa de Utilização na Pavimentação*. Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Campina Grande, 2003.

LING, M.; CURTIS, C.W.; HANSON, D.I.; HOLL, J.N. (1997) - Quantitative Analysis of Polymers and Crumb Rubber in Hot-Mix Asphalts. Transportation Research Record 1586 , TRB, Washington, DC, p. 57-67; 1997.

MAGALHÃES, S.T., *Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Pavimentos de Alto Desempenho*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE. Rio de Janeiro, 2004.

Manual de Asfalto (1989) Instituto de Asfalto. Série do Manual N° 4 (MS-4). PINHEIRO, J. H. M. *Incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias (Processos úmido e seco)*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2004.

MARQUES, G.L.O., 2001, *Procedimentos de avaliação e caracterização de agregados minerais usados na pavimentação asfáltica*. 1º Seminário de Qualificação Acadêmica ao Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

MARQUES, G.L.O., MOTTA, L.M.G., LEITE, L.M., et al. *Exemplos de Dosagem SUPERPAVE no Brasil*. In: 33ª Reunião Anual de Pavimentação, Associação Brasileira de Pavimentação, Florianópolis-SC, 2001.

MARQUES, J. A.; da PAZ, E. C. *Processos para reciclagem de pneus inservíveis*. Revista Pavimentação, Rio de Janeiro, n. 6, p. 16-23, 2007.

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.; MOTTA, L.M.G. Resilient behavior of Brazilian tropical soils in pavement design. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PAVEMENT EVALUATION AND OVERLAY DESIGN, 2., 1989, Rio de Janeiro. Proceedings... Rio de Janeiro: ABPv, 1989. v. 1, p. 1.1.1-22. . Mecânica dos pavimentos. 2. ed. Rio de Janeiro, 2005.

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; 1981.

MOTHÉ, M. G. *Estudo do comportamento de ligantes asfálticos por reologia e análise térmica*. Dissertação (Mestrado em Ciências)– Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Escola de Química, Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos – EQ, 2009.

MOTTA, L. M. G. (1998) *Contribuição para a Estimativa do Módulo Resiliente de Misturas Asfálticas*. 14º Encontro de Asfalto, IBP, Rio de Janeiro, RJ;1998.

MOTTA, L. M. G.; Tonial, I.; Leite, L. M., et al, Princípio do Projeto e Análise. Tradução comentada da publicação FHWA- SUPERPAVE de Misturas Asfálticas 95-003. Federal Highway Administration, Instituto Brasileiro do Petróleo. Rio de Janeiro, 1996.

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.

NEWCOMB, D. An Introduction to Warm-mix Asphalt. Disponível em: <http://www.hotmix.org>. Acesso em 14 de fevereiro de 2011.

NYNAS (2009). “Asfalto templado, semi-templado y frío: el caso a favor de lasostenibilidad”.NynasBitumen Magazine: Performance;2009.

ODA, S.; *Análise da viabilidade Técnica de Utilização do Ligante Asfáltico – borracha em Obras de Pavimentação* – Sandra Oda; 2000,

PATRIOTA, M. B. *Análise laboratorial de concreto betuminoso usinado a quente modificado com adição de borracha reciclada de pneus – processo seco*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil,Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2004.

PINTO, S. E L. M. G. MOTTA. *Catálogo de Curvas de Fadiga*. Boletim Técnico Nº16, Associação Brasileira de Pavimentação – ABPv. Rio de Janeiro, Brasil, 1995.

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.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE,D.Y. ; KENNEDY, T.W.; *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*, NAPA Educational Foundation. Lanham, Maryland, 1996

ROBERTS, F.L.; MOHAMMAD, L.N.; WANG, L.B. (2002) History of Hot Mix Asphalt Mixture Design in the United States. *Journal of Materials in Civil Engineering*, July/August, American Society of Civil Engineers, 150th Anniversary Paper; 2002..

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.

SACHET, T.; BALBO, J. T.; PINTO, P.; MUGAYAR, A. N.; C.; ALBUQUERQUE, M. C. F. *Avaliação do efeito da adição de borracha moída de pneus no concreto compactado com rolo*. In: Reuniao de Pavimentacao Urbana, 16., 2009, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: ABPv, 2009.

SASOL WAX. Roads and trials with Sasobit®. Disponível em: laboratorial de redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas” PROJETO DE PESQUISA CONCEPA – LAPAV ESTUDO LABORATORIAL Porto Alegre dezembro de 2007

SASOL WAX. Roads and trials with Sasobit®. Disponível em: http://www.sasolwax.com/data/sasolwax_/Bitumen%20Modification/Roads%20and%20trials.pdf. Acesso em 25 de novembro de 2006.

SAVILLE, V., & AXON, E. *Adhesion of Asphaltic Binders to Mineral Aggregates*. Association of Asphalt Paving Technologists. Proceedings of the Technical Sessions . USA, 1937.

SAVY FILHO, A. *Mamona: tecnologia agrícola*. Campinas: Emopi, 2005. 105p.

SAVY FILHO, A.; BANZATTO, N.V.; BARBOZA, M.Z. Mamoneira. In: CATI (Campinas, SP). *Oleaginosas no Estado de São Paulo: análise e diagnóstico*. Campinas, p.29. 1999

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.

SCHNORMEIER, R.H.(1980) – Eleven-Year Pavement Condition History of Asphalt-Rubber Seal in Phoenix, Arizona. *Asphalt Pavement Construction: New Materials Techniques*. ASTM Special Technical Publication 724. American Society for Testing and Materials. P. 13-21,1980.

SCHNORMEIER, R.H.(1983) – Use of Asphalt – Rubber on [Low Cost, Low Volume Street: A Review After 13 Year, *Transportation Research Record 898*, TRB, Washington, D.C, p. 62 -67;1983.

SCHNORMEIER, R.H.(1986) – Fifteen – Year Pavement Condition History of Asphalt-Rubber Membranes in Phoenix, Arizona. *Transportation Research Record 1096*, TRB, Washington, D.C, p. 344 -346; 1986

SHELL (1990) *The Shell Bitumen Handbook*, Shell Bitumen U.K.; 1990.

- SHELL, *The Shell bitumen handbook*. 5. ed. Cambridge, 2003.
- SHELL. *The Shell bitumen handbook*. 5. ed. London: Shell Bitumen/Thomas Telford Publishing, 2003.
- 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.
- SPECHT, L. Avaliação de misturas asfáticas com incorporação de borracha reciclada de pneus. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 280 p, 2004.
- SPECHT, L. P.; BORGES, P. A. P.; CERATTI, J. A. P. Análise reológica de ligantes modificados com borracha reciclada de pneus. *Revista Pavimentação*, Rio de Janeiro, n. 7, p. 37-44, 2007a.
- SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P; BRITO L. A. T. Avaliação das propriedades plásticas de misturas asfálticas com incorporação de borracha de pneus através dos processos úmido e seco. *Revista Pavimentação*, Rio de Janeiro, n. 8, p. 34-43, 2007b.
- VASCONCELOS, K. L., Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e SUPERPAVE com Diferentes Granulometrias. Dissertação de Mestrado, PETRAN/UFC, Fortaleza, CE,2004.
- VIEIRA, R. de M.; LIMA, E. F, Importância sócio econômica e melhoramento de plantas para o Nordeste brasileiro, Disponível em:<http://www.cpsa.embrapa.br/catalogo/livro/mamona.pdf>, Acesso em: 01/02/2005
- VIEIRA, R. de M.; LIMA, E.F.; AZEVEDO, D.M.P. de ; BATISTA, F.A.S.; SANTOS, J.W. dos; DOURADOS, R. M.F. *Competição de cultivares e linhagens de mamoneira no Nordeste do Brasil- 1993/96*. Campina Grande: EMBRAPA-CNPA, b. 4p, 1998.
- WAPA – WASHINGTON ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. *The WAPA asphalt pavement guide*. Washington, DC, 2004.
- 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.
- 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.

ZANZOTTO, L., KENNEPOHL, G.J. (1996) – *Development of Rubber and Asphalt Binder by Depolymerization and Devulcanization of Scrap tires in Asphalt*. Transportation Research Record 1530, TRB, Washington, DC, P. 51-58; 1996.

ANEXOS

Constam as planilhas de cálculo para as misturas asfálticas resultante dos experimentos realizados nessa pesquisa.

Anexo A – Caracterização Física dos Agregados, e resultados do Ensaio de Viscosidade

Constam as planilhas de cálculo para as misturas asfálticas resultante dos experimentos realizados segundo Metodologia Superpave.

Anexo B – Módulo Resiliência

Constam as planilhas de cálculo para as misturas asfálticas resultante do ensaio de Módulo de Resiliência conforme a ASTM D4123-83.

Anexo C – Compactação por Amassamento (Superpave)

Constam as planilhas de cálculo para as misturas asfálticas resultante da compactação por amassamento (Superpave).

Anexo A – Caracterização Física dos Agregados, e resultados do Ensaio de Viscosidade

Constam as planilhas de cálculo para as misturas asfálticas resultante dos experimentos realizados segundo metodologia Superpave, e gráficos resultantes do viscosímetro Brookfield..

PENEIRAMENTO Brita 19 7 kg					
PENEIRAS	MATERIAL RETIDO			% QUE PASSA	Peneira mm
	PESO(G)	%AMOSTRA TOTAL	% ACUMULADA	AMOSTRA TOTAL	
3 pol					76,2
2 pol					50,8
1 1/2pol					38,1
1 pol					25,4
3/4pol	656,2	9,37	9,37	90,63	19,1
1/2pol	2562,6	36,61	45,98	54,02	12,7
3/8pol	2091,1	29,87	75,86	24,14	9,5
Nº 4	1449,4	20,71	96,56	3,44	4,8
Nº 8					2,4
Nº 10	106,5	1,52	98,08	1,92	2,00
Nº 16					1,2
Nº 30					0,6
Nº 40	21,4	0,31	98,39	1,61	0,42
Nº 50					0,3
Nº 80	18,6	0,27	98,65	1,35	0,18
Nº 100					0,15
Nº 200	48,9	0,70	99,35	0,65	0,074

PENEIRAMENTO Brita 12 5 kg					
PENEIRAS	MATERIAL RETIDO			% QUE PASSA	Peneira mm
	PESO(G)	%AMOSTRA TOTAL	% ACUMULADA	AMOSTRA TOTAL	
3 pol					76,2
2 pol					50,8
1 1/2pol					38,1
1 pol					25,4
3/4pol	0	0	0	100	19,1
1/2pol	72,68	1,45	1,45	98,55	12,7
3/8pol	641	12,82	14,27	85,726	9,5
Nº 4	3266	65,32	79,59	20,406	4,8
Nº 8					2,4
Nº 10	854	17,08	96,67	3,33	2,00
Nº 16					1,2
Nº 30					0,6
Nº 40	83	1,66	98,33	1,67	0,42
Nº 50					0,3
Nº 80	16	0,32	98,65	1,346	0,18
Nº 100					0,15
Nº 200	24	0,48	99,13	0,866	0,074

PENEIRAMENTO Areia 1,5kg 28/11/2011					
PENEIRAS	MATERIAL RETIDO			% QUE PASSA	Peneira mm
	PESO(G)	%AMOSTRA TOTAL	% ACUMULADA	AMOSTRA TOTAL	
3 pol					76,2
2 pol					50,8
1 1/2pol					38,1
1 pol					25,4
3/4pol	0	0	0	100	19,1
1/2pol	0	0	0	100	12,7
3/8pol	0	0	0	100	9,5
Nº 4	7,51	0,50	0,50	99,50	4,8
Nº 8					2,4
Nº 10	108,14	7,21	7,71	92,29	2,00
Nº 16					1,2
Nº 30					0,6
Nº 40	539,6	35,97	43,68	56,32	0,42
Nº 50					0,3
Nº 80	499,6	33,31	76,99	23,01	0,18
Nº 100					0,15
Nº 200	269,33	17,96	94,95	5,05	0,074

PENEIRAMENTO Pó de Pedra 1,5 kg					
PENEIRAS	MATERIAL RETIDO			% QUE PASSA	Peneira mm
	PESO(G)	%AMOSTRA TOTAL	% ACUMULADA	AMOSTRA TOTAL	
3 pol					76,2
2 pol					50,8
1 1/2pol					38,1
1 pol					25,4
3/4pol		0	0	100	19,1
1/2pol		0	0	100	12,7
3/8pol		0,00	0,00	100,00	9,5
Nº 4	71,6	4,77	4,77	95,23	4,8
Nº 8					2,4
Nº 10	410,22	27,35	32,12	67,88	2,00
Nº 16					1,2
Nº 30					0,6
Nº 40	500,8	33,39	65,51	34,49	0,42
Nº 50					0,3
Nº 80	227,03	15,14	80,64	19,36	0,18
Nº 100					0,15
Nº 200	142,85	9,52	90,17	9,83	0,074

planilha 02 - Densidade Real

DNER - ME 084/95

Areia

Picnometro 1	Picnometro 2	
129,24	131,76	Peso seco do picnômetro
629,30	631,90	Peso picnometro + material
938,32	935,70	Peso picnometro + material+água
627,00	624,50	Peso picnometro+água

$D_{(1)} = \frac{2,64946}{5} = 0,529892$ **DR= 2,648**

$D_{(2)} = \frac{2,64708}{4} = 0,66177$

Pó de Pedra

Picnometro 1	Picnometro 2	
129,25	131,79	Peso seco do picnômetro
628,90	631,70	Peso picnometro + material
933,60	932,00	Peso picnometro + material+água
627,30	625,00	Peso picnometro+água

$D_{(1)} = \frac{2,58417}{4} = 0,6460425$ **DR= 2,588**

$D_{(2)} = \frac{2,59141}{6} = 0,43190166$

planilha 03 - Equivalente Areia - AREIA

Valores das leituras

	T1	T2
L1	12,20	12,80
L2	8,00	9,00

$H(\text{RAZÃO}) = \frac{12,20}{8,00} = 1,525$ $H(\text{RAZÃO}) = \frac{12,80}{9,00} = 1,4222$ **MÉDIA= 0,68**

planilha 03 - Equivalente Areia - PÓ DE PEDRA

Valores das leituras

	T1	T2
L1	13,10	12,70
L2	7,50	7,20

H(RAZÃO)	0,572519	H(RAZÃO)	0,566929	MÉDIA=	0,57
----------	----------	-----------	----------	--------	------

planilha 04 - Abrasão Los Angeles			DNER-ME 035/98		
mn=	5,00				
m'n=	3,58				
A n=	0,284	28,40%			

planilha 05 - Densidade e absorção brita 19"		DNIT - ME 081/98			
brita seca no pano	3006,70 g	Densidade Aparente	Dap=	2,76 g/cm ³	
peso submerso	1922,60 g	Densidade Real	Dr=	2,77 g/cm ³	
				0,0036	
peso seco pós estufa	2995,80 g	Absorção	a=	38	0,36%

planilha 05 - Densidade e absorção brita 12,5"					
brita seca no pano	2006,9	Densidade Aparente	Dap=	2,63	
peso submerso	1246,1	Densidade Real	Dr=	2,64	
peso seco pós estufa	1998,14	Absorção	a=	0,0044	0,44%

planilha 06 - Penetração do cap 50/70 puro		amostra CAP+ 6% mamona	
1	65 mm	1	79 mm
2	62 mm	2	75 mm
3	61 mm	3	74 mm
4	59 mm	4	70 mm
amostra SBS		amostra CAP+ 7% mamona	
1	60 mm	1	76 mm
2	61 mm	2	82 mm
3	60 mm	3	76 mm
4	61 mm	4	80 mm
amostra CAP+ 2% mamona		amostra CAP+ 8% mamona	
1	53 mm	1	88 mm
2	56 mm	2	90 mm
3	50 mm	3	96 mm
4	54 mm		

Rheocalc V3.3 Build 49-1

Brookfield Engineering Labs

File: E:\RANDER - CAP\CAP +MAMONA\CAP+2%\AMOSTRA 1 - CAP 2%.DB

Test Date: 14/10/2011 **Test Time:** 10:15:35

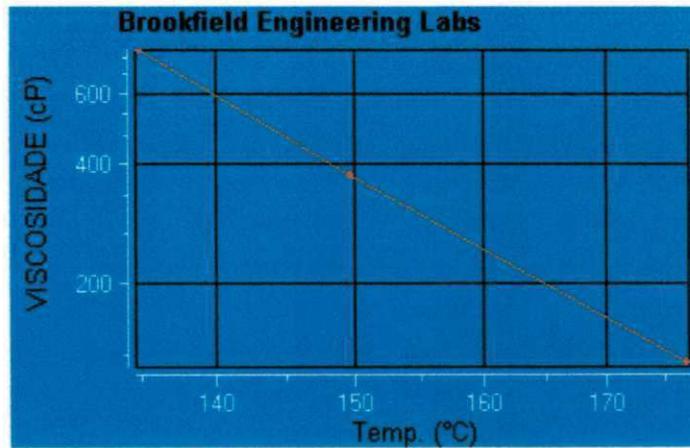
Model: RV

Spindle: SC4-21

Sample Name: (Sample)

#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	765,00	20,00	30,6	142,29	18,60	134,8	135,1	00:20:01,2
2	375,00	50,00	37,5	174,38	46,50	149,8	150,0	00:39:05,3
3	127,00	100,00	25,5	118,11	93,00	176,8	177,2	00:40:24,6

Notes:



Rheocalc V3.3 Build 49-1

Brookfield Engineering Labs

File: E:\RANDER - CAP\CAP +MAMONA\CAP+2%\AMOSTRA 2 - CAP 2%.DB

Test Date: 14/10/2011 **Test Time:** 10:26:01

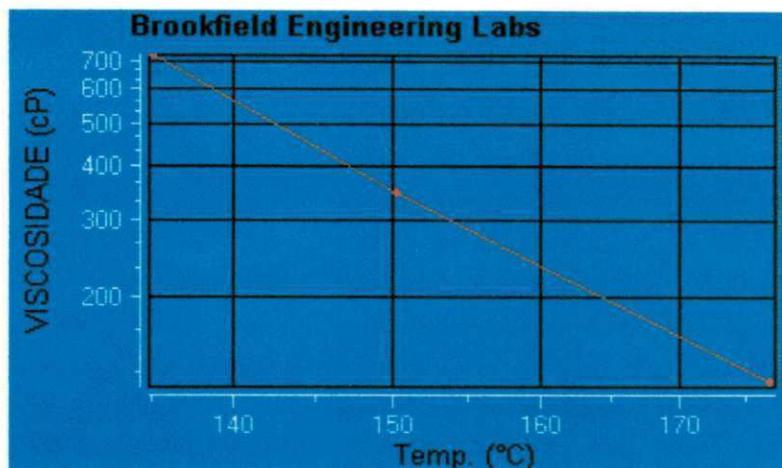
Model: RV

Spindle: SC4-21

Sample Name: (Sample)

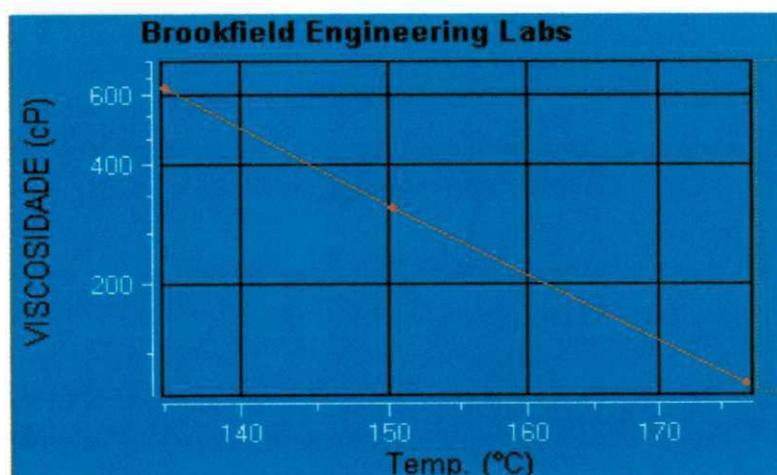
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	717,50	20,00	28,7	133,46	18,60	135,2	135,0	00:20:01,2
2	346,00	50,00	34,6	160,89	46,50	150,3	150,2	00:38:20,8
3	126,50	100,00	25,3	117,65	93,00	177,1	176,9	00:39:32,6

Notes:



Rheocalc V3.3 Build 49-1			Brookfield Engineering Labs					
File: E:\RANDER - CAP\CAP +MAMONA\CAP+3%\AMOSTRA2 -CAP3%.DB								
Test Date: 19/8/2011 Test Time: 09:46:15			Model: RV		Spindle: SC4-21			
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	627,50	20,00	25,1	116,72	18,60	135,3	135,1	00:20:01,5
2	309,00	50,00	30,9	143,69	46,50	150,3	150,1	00:38:19,7
3	110,50	100,00	22,1	102,77	93,00	177,3	177,1	00:39:33,6

Notes:



Rheocalc V3.3 Build 49-1 **Brookfield Engineering Labs**

File: E:\RANDER - CAP\CAP +MAMONA\CAP+48\AMOSTRA-48.DB

Test Date: 16/8/2011 Test Time: 09:42:09

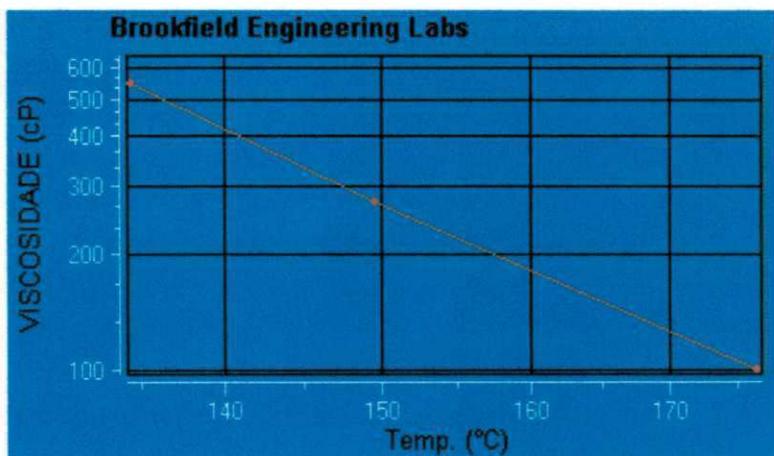
Model: RV

Spindle: SC4-21

Sample Name: (Sample)

#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	545,00	20,00	21,8	101,37	18,60	134,5	134,8	00:20:08,0
2	271,00	50,00	27,1	126,02	46,50	149,6	149,8	00:39:05,4
3	100,00	100,00	20,0	93,00	93,00	176,6	177,1	00:41:10,6

Notes:



Rheocalc V3.3 Build 49-1 **Brookfield Engineering Labs**

File: E:\RANDER - CAP\CAP +MAMONA\CAP+48\AMOSTRA 2 -48.DB

Test Date: 16/8/2011 Test Time: 09:58:34

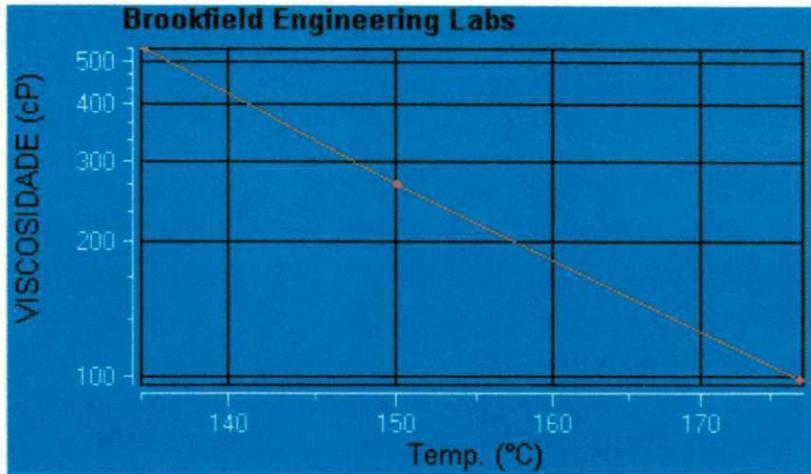
Model: RV

Spindle: SC4-21

Sample Name: (Sample)

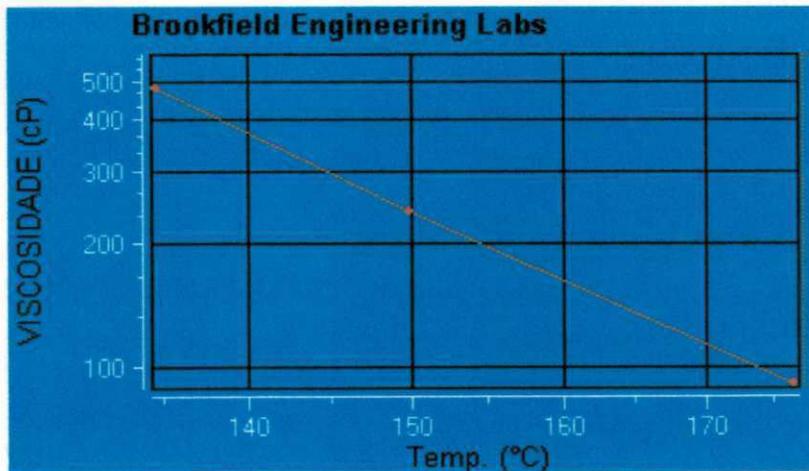
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	530,00	20,00	21,2	98,58	18,60	135,3	135,0	00:20:01,6
2	266,00	50,00	26,6	123,69	46,50	150,1	149,9	00:38:19,6
3	98,00	100,00	19,6	91,14	93,00	177,1	176,9	00:39:35,8

Notes:



Rheocalc V3.3 Build 49-1				Brookfield Engineering Labs				
File: E:\RANDER - CAP\CAP +MAMONA\CAP+5%\CAP+5% - AMOSTRA1.DB								
Test Date: 11/8/2011 Test Time: 15:06:28				Model: RV		Spindle: SC4-21		
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	502,50	20,00	20,1	93,47	18,60	134,8	135,1	00:20:16,1
2	252,00	50,00	25,2	117,18	46,50	149,6	149,8	00:39:05,8
3	94,00	100,00	18,8	87,42	93,00	176,6	177,0	00:40:28,3

Notes:



Rheocalc V3.3 Build 49-1

Brookfield Engineering Labs

File: E:\RANDER - CAP\CAP +MAMONA\CAP+58\CAP+58 - AMOSTRA2.DB

Test Date: 11/8/2011 Test Time: 15:24:47

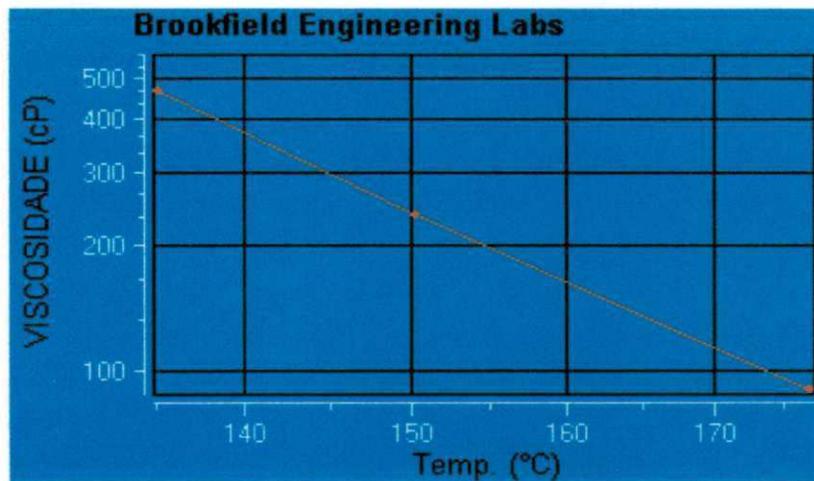
Model: RV

Spindle: BC4-21

Sample Name: (Sample)

#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	485,00	20,00	19,4	90,21	18,60	135,3	135,0	00:20:02,3
2	244,00	50,00	24,4	113,46	46,50	150,3	150,1	00:38:20,2
3	91,50	100,00	18,3	85,10	93,00	177,1	176,9	00:39:34,4

Notes:



Rheocalc V3.3 Build 49-1

Brookfield Engineering Labs

File: E:\RANDER - CAP\CAP +MAMONA\CAP+68\AMOSTRA1

Test Date: 23/11/2011 Test Time: 09:53:03

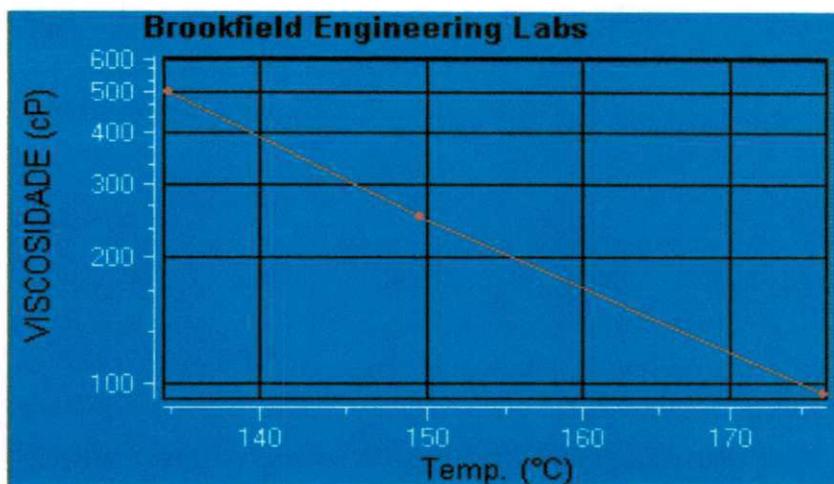
Model: RV

Spindle: BC4-21

Sample Name: (Sample)

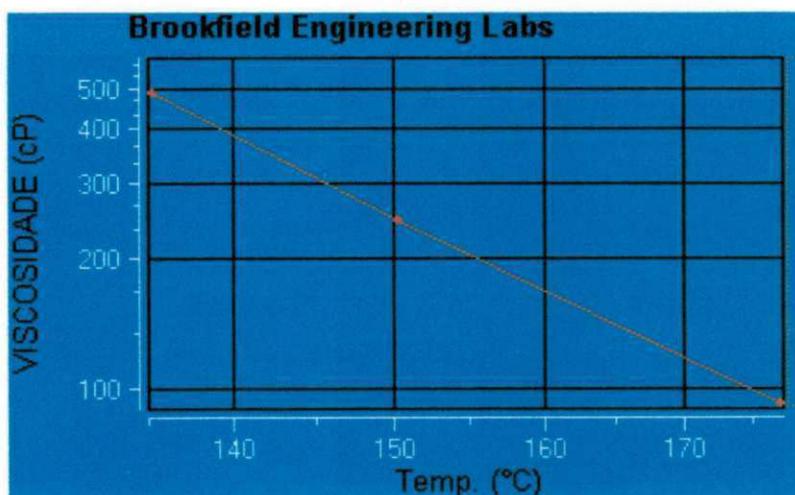
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	485,00	20,00	19,4	90,21	18,60	135,2	134,9	00:20:01,1
2	244,00	50,00	24,4	113,46	46,50	150,3	150,0	00:38:20,4
3	102,50	100,00	20,5	95,33	93,00	177,1	176,9	00:39:36,9

Notes:



Rheocalc V3.3 Build 49-1		Brookfield Engineering Labs						
File: E:\RANDER - CAP\CAP +MAMONA\CAP+7%\AMOSTRA 2								
Test Date: 21/10/2011			Test Time: 11:23:51			Model: RV		Spindle: SC4-21
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	467,50	20,00	18,7	86,96	18,60	135,4	135,1	00:20:01,1
2	243,00	50,00	24,3	113,00	46,50	150,2	149,9	00:38:19,9
3	94,00	100,00	18,8	87,42	93,00	177,0	176,8	00:39:31,3

Notes:



Rheocalc V3.3 Build 49-1

Brookfield Engineering Labs

File: - CAP\CAP +MAMONA\CAP+7%\AMOSTRAL -CAP7%.DB

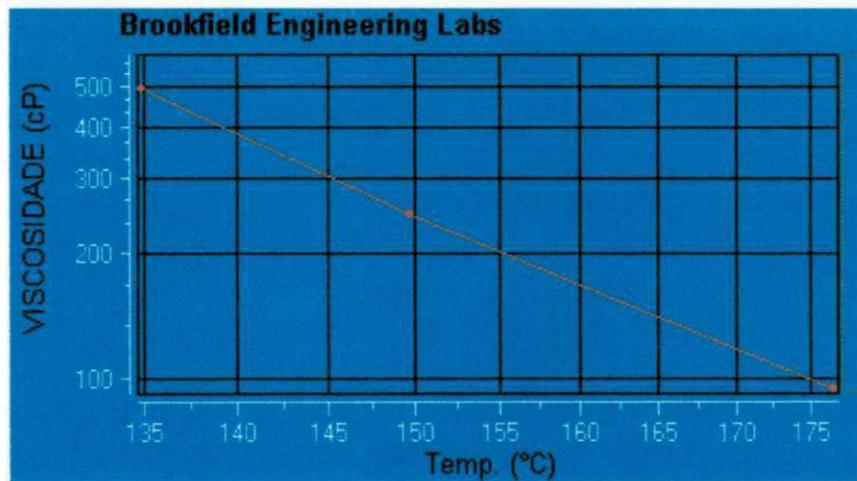
Test Date: 15/8/2011 Test Time: 15:57:36

Model: RV Spindle: SC4-21

Sample Name: (Sample)

#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	477,50	20,00	19,1	88,82	18,60	134,6	134,9	00:23:51,4
2	241,00	50,00	24,1	112,07	46,50	149,9	150,1	00:39:07,5
3	91,00	100,00	18,2	84,63	93,00	176,6	177,1	00:41:10,4

Notes:



Rheocalc V3.3 Build 49-1

Brookfield Engineering Labs

File: - CAP\CAP +MAMONA\CAP+7%\AMOSTRA 2 -CAP7%.DB

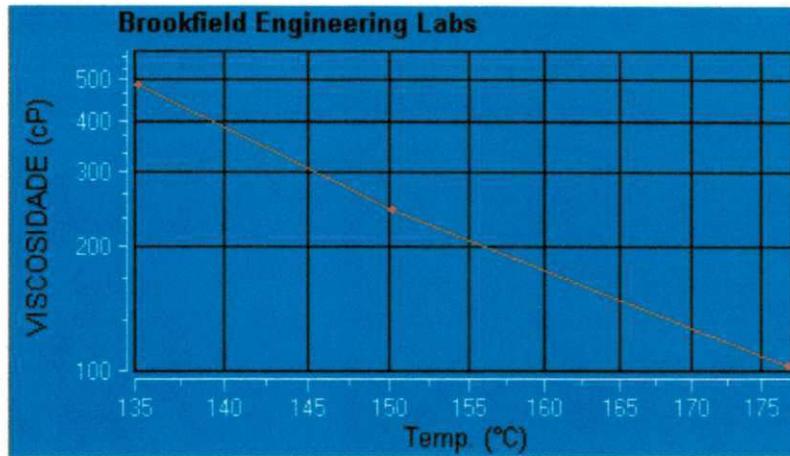
Test Date: 15/8/2011 Test Time: 16:06:08

Model: RV Spindle: SC4-21

Sample Name: (Sample)

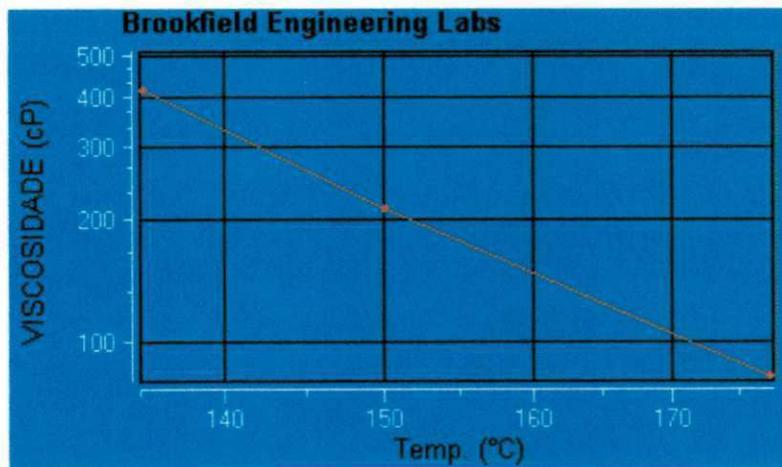
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	467,50	20,00	18,7	86,96	18,60	135,1	134,8	00:20:03,2
2	236,00	50,00	23,6	109,74	46,50	150,3	150,1	00:38:18,4
3	90,00	100,00	18,0	83,70	93,00	177,0	176,8	00:39:32,8

Notes:



Rheocalc V3.3 Build 49-1			Brookfield Engineering Labs					
File: E:\RANDER - CAP\CAP +MAMONA\CAP+8%\AMOSTRA 01-8%.DB								
Test Date: 8/11/2011 Test Time: 10:32:33			Model: RV		Spindle: sc4-21			
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	412,50	20,00	16,5	76,73	18,60	135,2	134,9	00:20:01,6
2	212,00	50,00	21,2	98,58	46,50	150,1	150,0	00:38:19,3
3	82,00	100,00	16,4	76,26	93,00	177,4	177,2	00:39:39,1

Notes:



Rheocalc V3.3 Build 49-1

Brookfield Engineering Labs

File: E:\RANDER - CAP\CAP +MAMONA\CAP+8%\AMOSTRA 02-8%.DB

Test Date: 8/11/2011 Test Time: 10:35:50

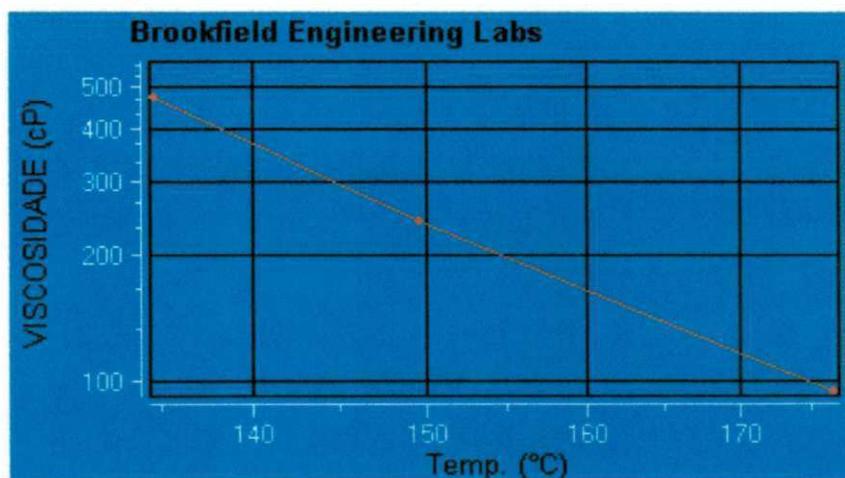
Model: RV

Spindle: SC4-21

Sample Name: (Sample)

#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	475,00	20,00	19,0	88,35	18,60	134,6	134,8	00:22:52,4
2	240,00	50,00	24,0	111,60	46,50	149,7	149,8	00:39:10,7
3	94,50	100,00	18,9	87,88	93,00	176,6	176,9	00:40:32,6

Notes:



Rheocalc V3.3 Build 49-1

Brookfield Engineering Labs

File: E:\RANDER - CAP\CAP +MAMONA\CAP+8%\AMOSTRA 02-8%.DB

Test Date: 8/11/2011 Test Time: 10:35:50

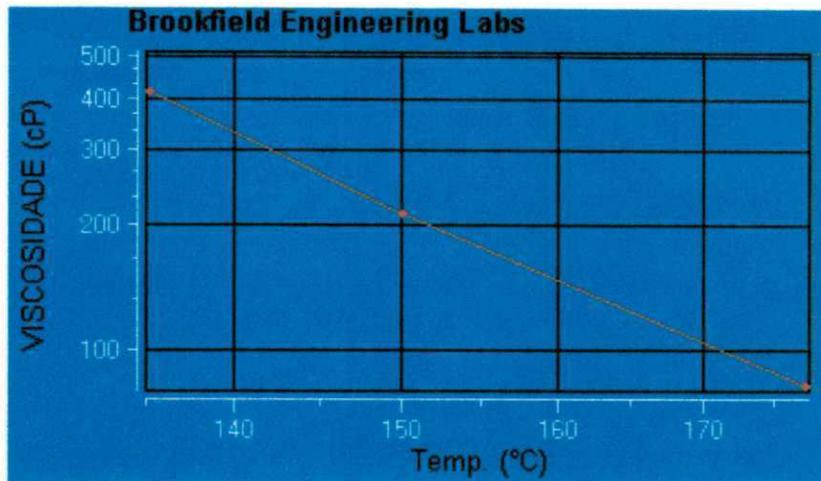
Model: RV

Spindle: SC4-21

Sample Name: (Sample)

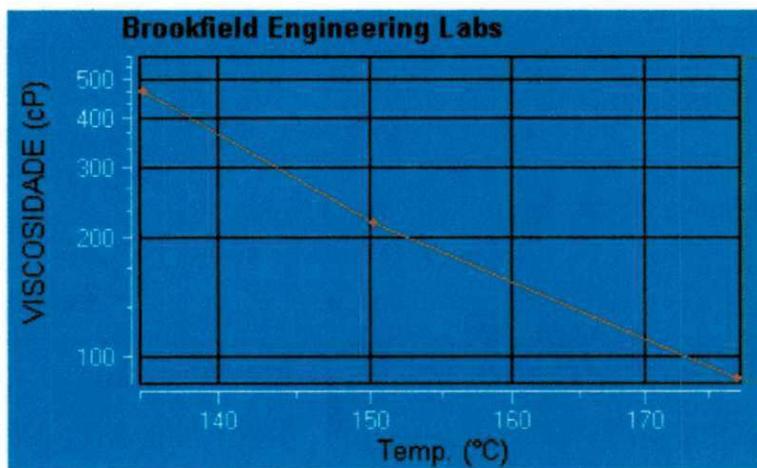
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	475,00	20,00	19,0	88,35	18,60	134,6	134,8	00:22:52,4
2	240,00	50,00	24,0	111,60	46,50	149,7	149,8	00:39:10,7
3	94,50	100,00	18,9	87,88	93,00	176,6	176,9	00:40:32,6

Notes:



Rheocalc V3.3 Build 49-1		Brookfield Engineering Labs						
File: E:\RANDER - CAP\CAP +MAMONA\CAP+9%\AMOSTRA 02- CAP 9.DB								
Test Date: 16/11/2011 Test Time: 10:22:51				Model: RV		Spindle: BC4-21		
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	417,50	20,00	16,7	77,66	18,60	134,6	134,9	00:20:19,8
2	228,00	50,00	22,8	106,02	46,50	149,7	149,8	00:39:10,3
3	83,50	100,00	16,7	77,66	93,00	176,7	177,0	00:40:29,6

Notes:



Rheocalc V3.3 Build 49-1 **Brookfield Engineering Labs**

File: E:\RANDER - CAP\CAP +MAMONA\CAP+9%\AMOSTRA 01- CAP 9.DB

Test Date: 16/11/2011 Test Time: 10:22:13

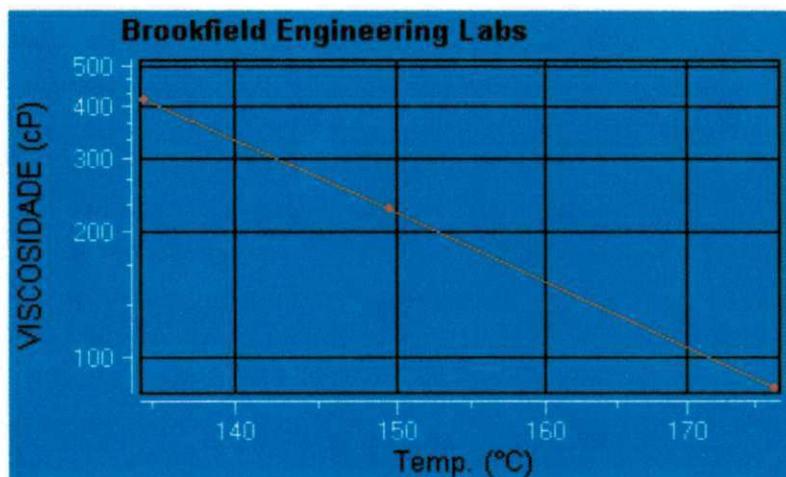
Model: RV

Spindle: SC4-21

Sample Name: (Sample)

#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	467,50	20,00	18,7	86,96	18,60	135,3	135,1	00:20:01,4
2	218,00	50,00	21,8	101,37	46,50	150,3	150,1	00:38:20,2
3	87,50	100,00	17,5	81,38	93,00	177,3	177,1	00:39:33,9

Notes:



Rheocalc V3.3 Build 49-1 **Brookfield Engineering Labs**

File: E:\RANDER - CAP\CAP +MAMONA\CAP+10%\11-08-2011-AMOSTRA 1 - 10%.DB

Test Date: 11/8/2011 Test Time: 10:01:24

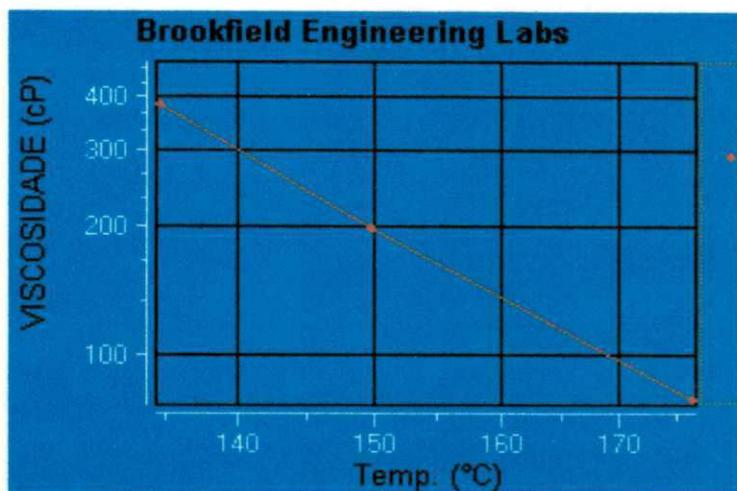
Model: RV

Spindle: SC4-21

Sample Name: (Sample)

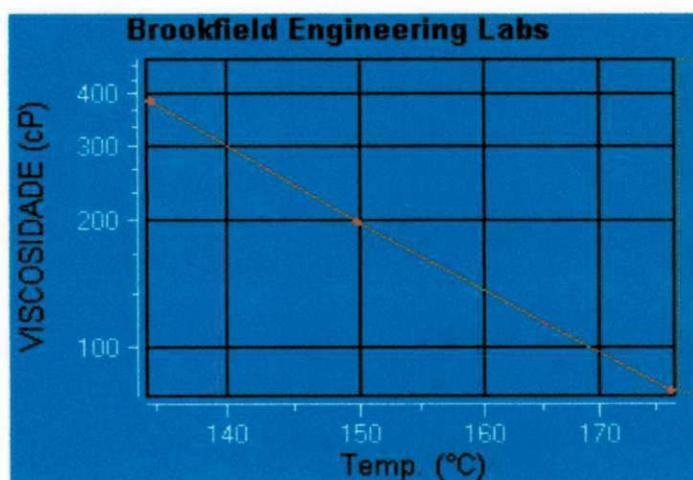
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	382,50	20,00	15,3	71,15	18,60	134,6	134,9	00:23:18,3
2	199,00	50,00	19,9	92,54	46,50	149,9	150,2	00:39:04,2
3	78,50	100,00	15,7	73,01	93,00	176,5	176,9	00:40:26,5

Notes:



Rheocalc V3.3 Build 49-1		Brookfield Engineering Labs						
File: E:\RANDER - CAP\CAP +MAMONA\CAP+10%\11-08-2011 - AMOSTRA2 - 10%.DB								
Test Date: 11/8/2011 Test Time: 10:07:31			Model: RV		Spindle: SC4-21			
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	372,50	20,00	14,9	69,29	18,60	135,3	135,1	00:20:01,8
2	195,00	50,00	19,5	90,68	46,50	150,3	150,1	00:38:18,4
3	76,50	100,00	15,3	71,15	93,00	177,0	176,8	00:39:35,5

Notes:



Rheocalc V3.3 Build 49-1

Brookfield Engineering Labs

File: E:\RANDER - CAP\CAP PURO 13-06-2011\RANDER CAP PURO AMOSTRA 1.DB

Test Date: 13/6/2011 Test Time: 16:40:09

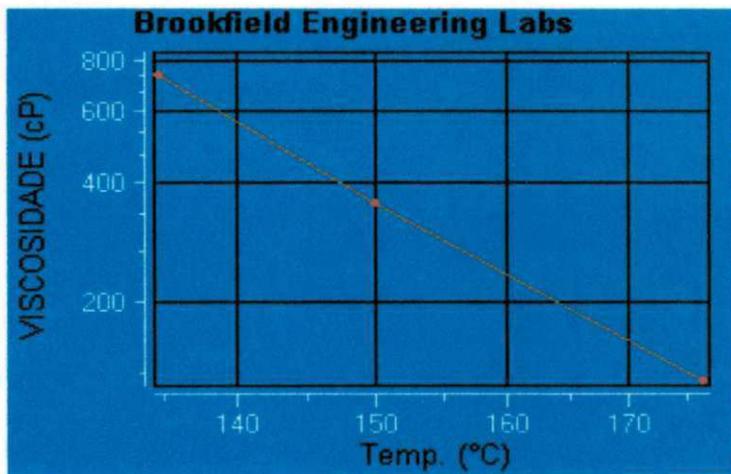
Model: RV

Spindle: SC4-21

Sample Name:

#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	735,00	20,00	29,4	136,71	18,60	134,7	134,9	00:23:21,5
2	354,00	50,00	35,4	164,61	46,50	149,9	150,1	00:39:02,2
3	127,00	100,00	25,4	118,11	93,00	176,5	176,9	00:41:05,3

Notes:



Rheocalc V3.3 Build 49-1

Brookfield Engineering Labs

File: E:\RANDER - CAP\CAP PURO 13-06-2011\RANDER CAP PURO AMOSTRA 2.DB

Test Date: 13/6/2011 Test Time: 16:44:25

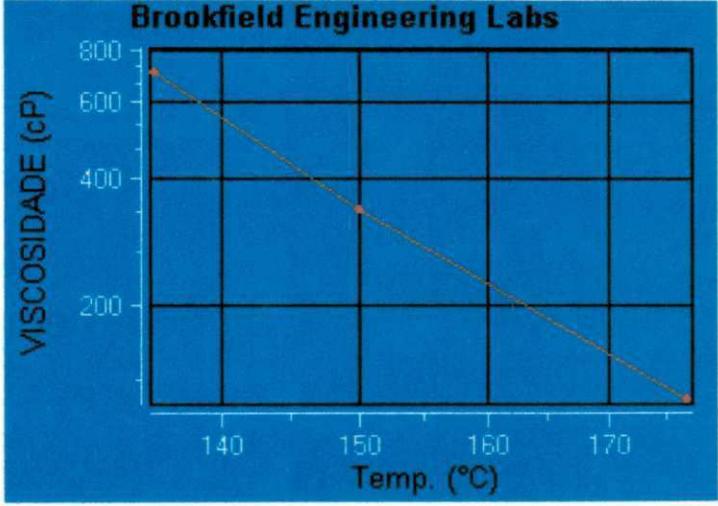
Model: RV

Spindle: SC4-21

Sample Name:

#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	702,50	20,00	28,1	130,67	18,60	135,4	135,2	00:20:04,5
2	338,00	50,00	33,8	157,17	46,50	150,1	149,9	00:38:18,6
3	119,50	100,00	23,9	111,14	93,00	177,0	176,8	00:39:31,8

Notes:



Anexo B – Módulo Resiliência

Constam as planilhas de cálculo para as misturas asfálticas resultante do ensaio de Módulo de Resiliência conforme a ASTM D4123-83.

Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Leonardo\3%mamona - CP I.D003
 Template file name: C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Templates\temp2.P003
 Test date & time: 16/3/2012 09:38:37
 Project: Leonardo
 Operator: leda
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1080
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: 3%mamona - CP I
 Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	66,6	66,5	65,9				66,3	0,4
Diameter (mm)	99,8	99,8	100,0				99,9	0,1

Cross-sectional area (mm²): 7833,1

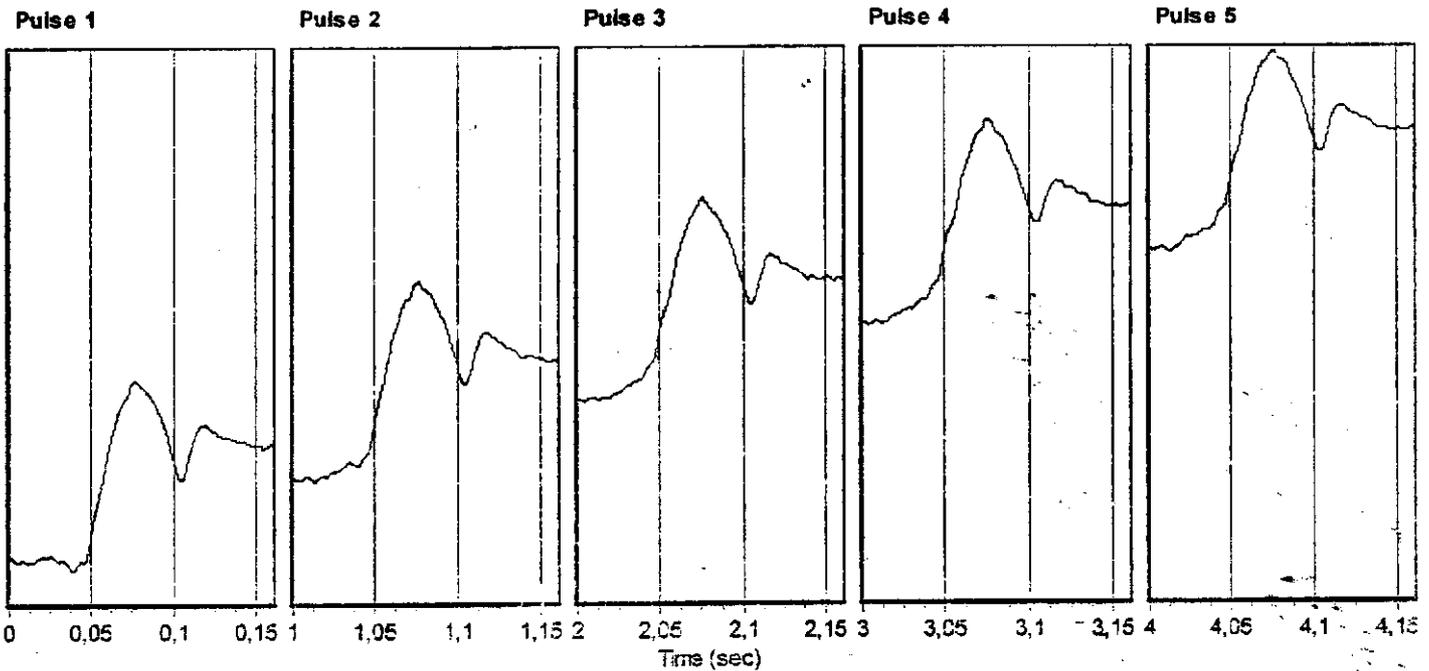
Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l defn/pulse (µm): 1,591000

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	2808	2760	2726	2692	2779	2753	40,27	1,46
Total recoverable horiz. deform. (µm)	3,88	3,95	4,00	4,05	3,92	3,96	0,06	1,55
Peak loading force (N)	1078	1081	1080	1080	1078	1079	1,27	0,12
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	2,71	2,61	2,55	2,51	2,44	2,56	0,09	3,51
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,17	1,35	1,45	1,54	1,48	1,40	0,13	9,30
Seating force (N)	108	108	108	108	109	108	0,22	0,20

— Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Leonardo\3%mamona - CP I -2leitura.D003
 Template file name: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\temp2.P003
 Test date & time: 16/3/2012 09:54:41

Project: Leonardo
 Operator: leda
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1080
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: 3%mamona - CP I
 Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	68,6	66,5	65,9				66,3	0,4
Diameter (mm)	99,8	99,8	100,0				99,9	0,1

Cross-sectional area (mm²): 7833,1

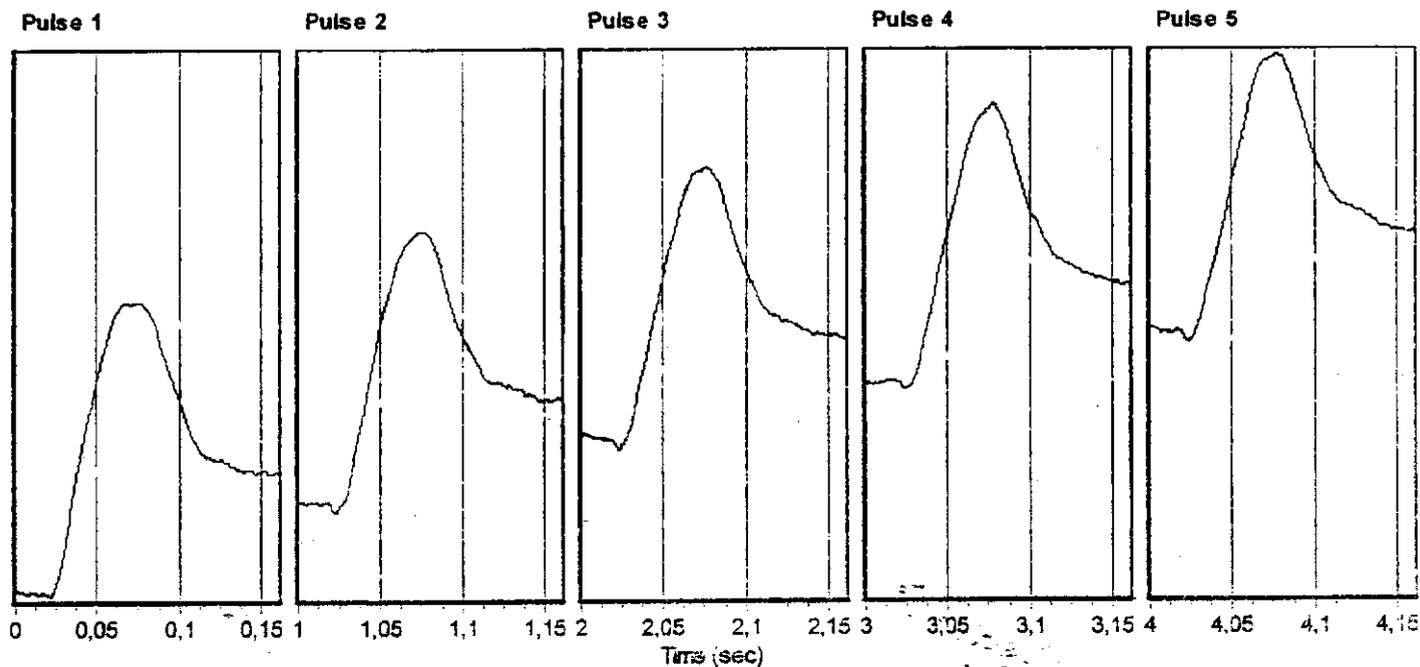
Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l def'n/pulse (µm): 1,764000

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	2248	2179	2149	2151	2168	2179	36,27	1,66
Total recoverable horiz. deform. (µm)	4,86	5,01	5,08	5,08	5,03	5,01	0,08	1,63
Peak loading force (N)	1081	1080	1081	1081	1080	1081	0,57	0,05
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	2,74	2,85	2,78	2,69	2,58	2,73	0,09	3,29
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	2,12	2,16	2,30	2,38	2,45	2,28	0,13	5,56
Seating force (N)	108	107	108	108	108	108	0,16	0,15

— Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. tvdts only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\NPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Leonardo\3%mamona - CP II -2 leitura.D003

Template file name: C:\NPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\temp2.P003

Test date & time: 16/3/2012 10:01:03

Project: Leonardo

Operator: leda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1080
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: 3%mamona - CP II
 Remarks...

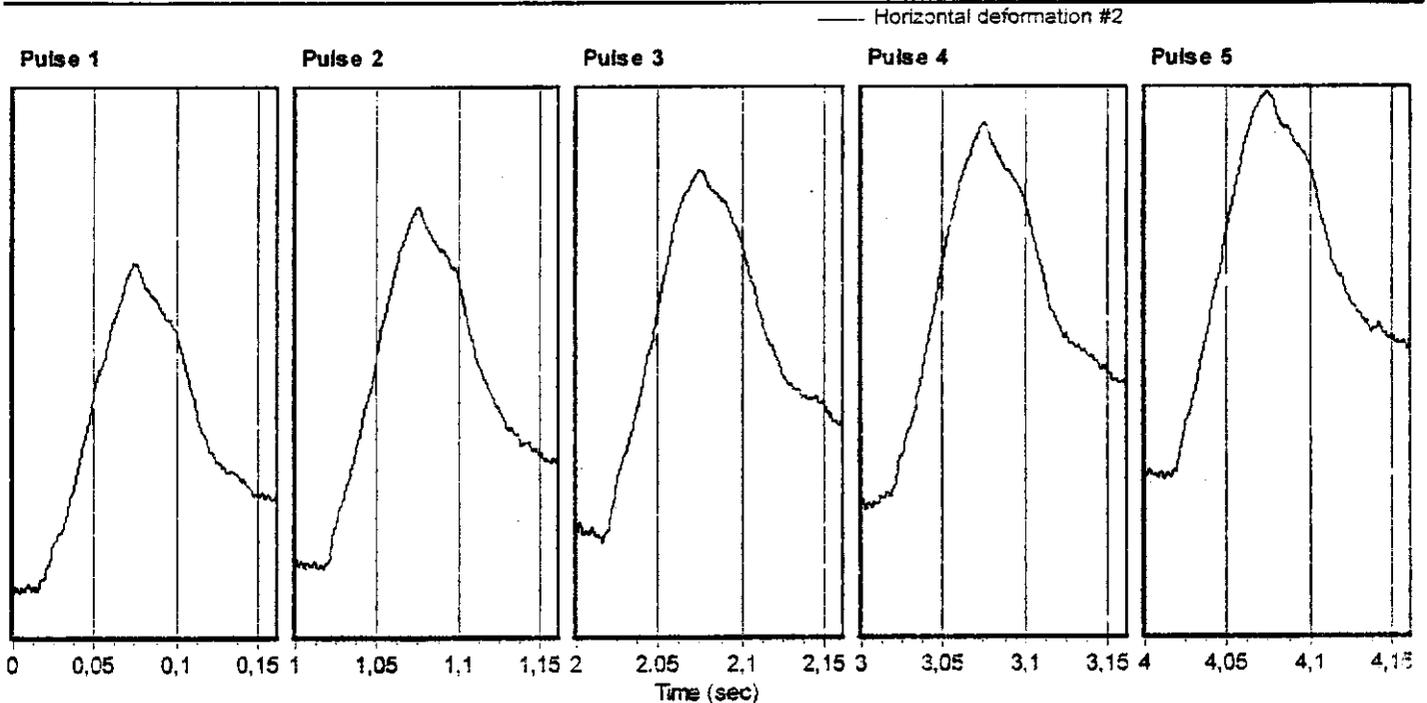
Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	66,8	66,5	66,6				66,6	0,2
Diameter (mm)	100,0	100,2	100,0				100,1	0,1

Cross-sectional area (mm²): 7864,5

Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4
 Perm't horiz'l defn/pulse (µm): 0,781700

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	3480	3361	3300	3275	3253	3334	81,43	2,44
Total recoverable horiz. deform. (µm)	3,13	3,23	3,28	3,31	3,33	3,26	0,07	2,23
Peak loading force (N)	1082	1080	1077	1079	1077	1079	2,00	0,19
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,52	1,51	1,44	1,36	1,39	1,44	0,06	4,35
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,61	1,72	1,84	1,95	1,93	1,81	0,13	7,19
Seating force (N)	108	108	108	108	108	108	0,16	0,14



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Leonardo\3%mamona - CP II.D003
 Template file name: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\temp2.P003
 Test date & time: 16/3/2012 10:00:17
 Project: Leonardo
 Operator: leda
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1080
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: 3%mamona - CP II
 Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	66,8	66,5	66,6				66,6	0,2
Diameter (mm)	100,0	100,2	100,0				100,1	0,1

Cross-sectional area (mm²): 7864,5

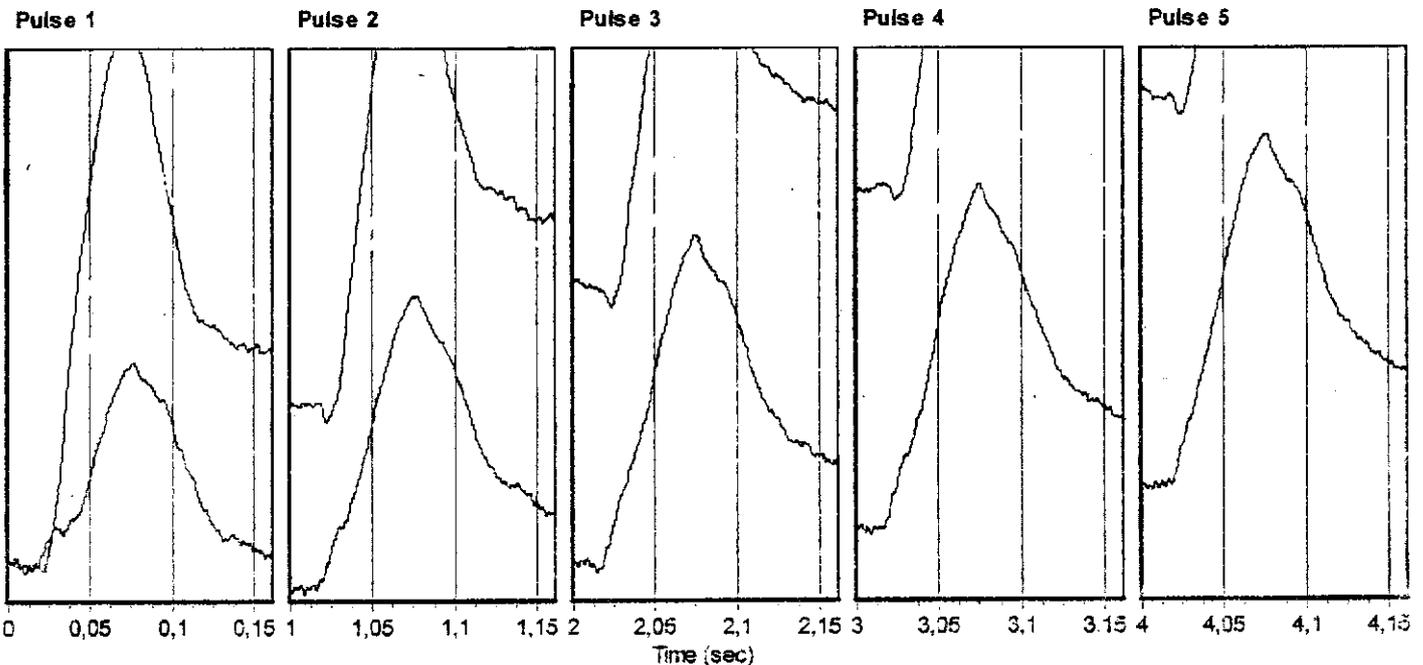
Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l def'n/pulse (µm): 0,831900

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	3562	3395	3323	3314	3279	3374	100,98	2,99
Total recoverable horiz. deform. (µm)	3,04	3,19	3,27	3,27	3,31	3,22	0,09	2,93
Peak loading force (N)	1078	1078	1081	1078	1078	1079	1,08	0,10
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,71	1,63	1,58	1,51	1,50	1,58	0,08	4,87
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,34	1,56	1,70	1,76	1,81	1,63	0,17	10,34
Seating force (N)	108	108	108	109	108	108	0,27	0,25

— Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\NPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Leonardo\7%mamona - CP I.D003

Template file name: C:\NPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\temp2.P003

Test date & time: 6/3/2012 10:01:19

Project: Leonardo

Operator: leda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 50

Peak loading force (N): 910
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: 7%mamona - CP I
 Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	65,5	65,4	65,5				65,5	0,1
Diameter (mm)	100,0	100,1	100,4				100,2	0,2

Cross-sectional area (mm²): 7880,2

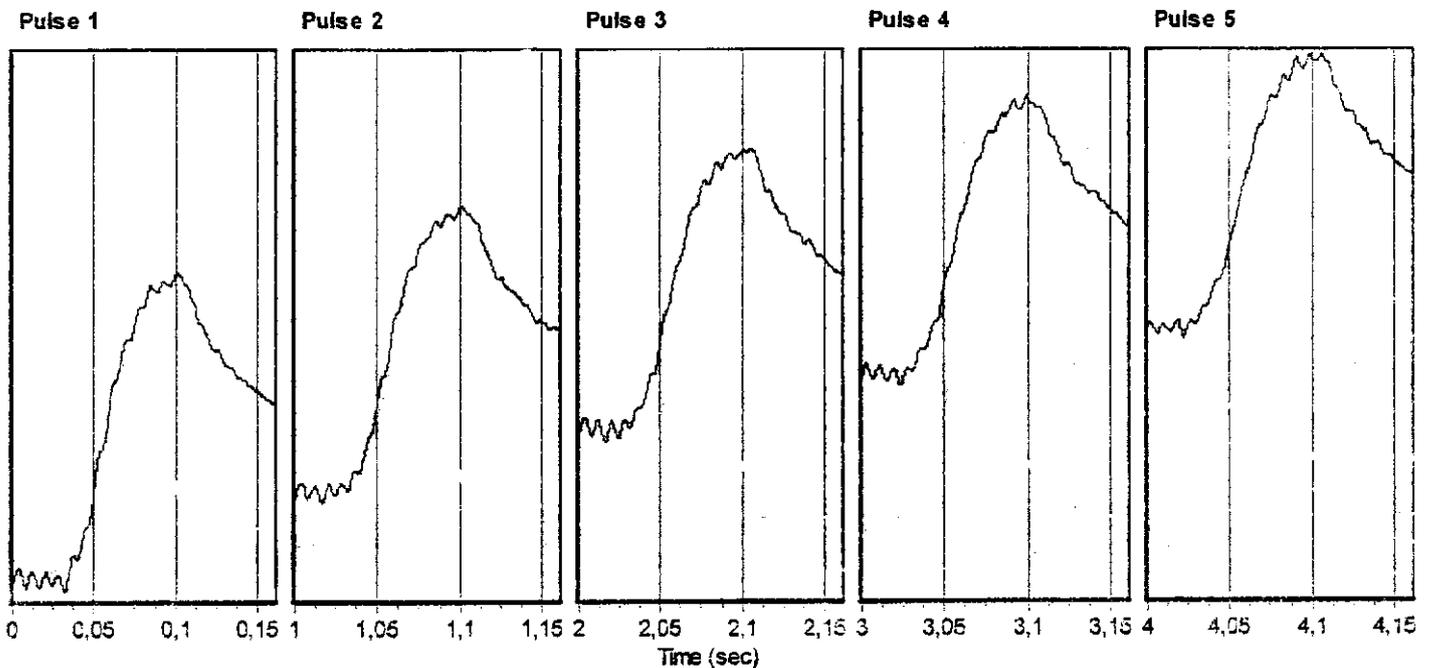
Test Results

Conditioning pulses: 50
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l def'n/pulse (µm): 1,076000

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	3474	3330	3241	3178	3230	3290	103,87	3,16
Total recoverable horiz. deform. (µm)	2,69	2,79	2,87	2,93	2,88	2,83	0,08	2,98
Peak loading force (N)	912	908	907	909	909	909	1,40	0,15
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,23	1,35	1,40	1,48	1,51	1,40	0,10	7,12
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,45	1,44	1,46	1,45	1,37	1,43	0,03	2,36
Seating force (N)	91	91	91	91	91	91	0,17	0,19

— Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. Ivdts only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\NPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Leonardo\7%mamona - CP II - 2 leitura.D003

Template file name: C:\NPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\temp2.P003

Test date & time: 6/3/2012 10:11:57

Project: Leonardo

Operator: leda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 910
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: 7%mamona - CP II
 Remarks...

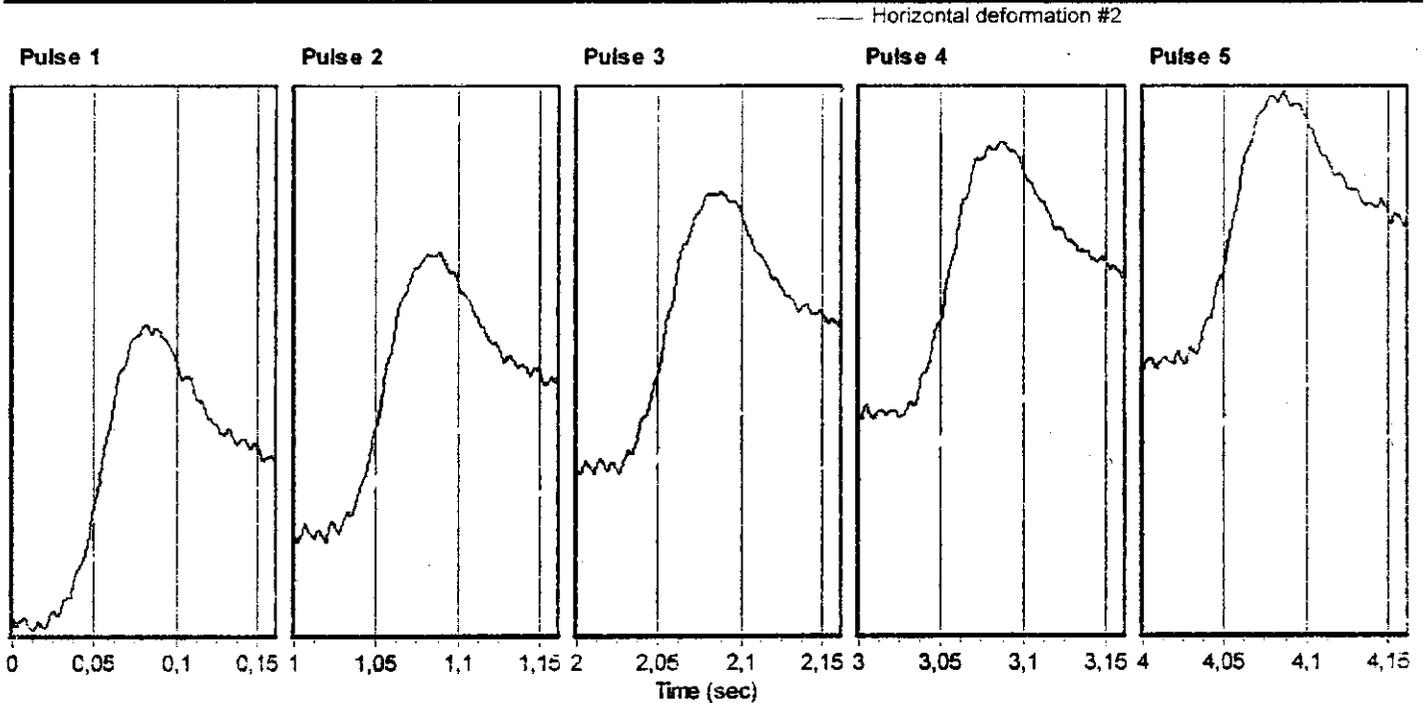
Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	66,0	66,1	66,0				66,0	0,1
Diameter (mm)	100,0	99,9	99,7				99,9	0,2

Cross-sectional area (mm²): 7833,1

Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4
 Perm't horiz'l defn/pulse (µm): 1,029000

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	3623	3506	3356	3294	3293	3414	130,12	3,81
Total recoverable horiz. deform. (µm)	2,55	2,63	2,75	2,80	2,79	2,70	0,10	3,63
Peak loading force (N)	910	908	908	908	906	908	1,21	0,13
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,24	1,29	1,32	1,38	1,40	1,32	0,06	4,37
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,31	1,34	1,43	1,42	1,40	1,38	0,05	3,32
Seating force (N)	91	91	91	91	91	91	0,22	0,24



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: C:\NPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Leonardo\7%mamona - CP II.D003
 Template file name: C:\NPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\temp2.P003
 Test date & time: 6/3/2012 10:10:56
 Project: Leonardo
 Operator: leda
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 910
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: 7%mamona - CP II
 Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	66,0	66,1	66,0				66,0	0,1
Diameter (mm)	100,0	99,9	99,7				99,9	0,2

Cross-sectional area (mm²): 7833,1

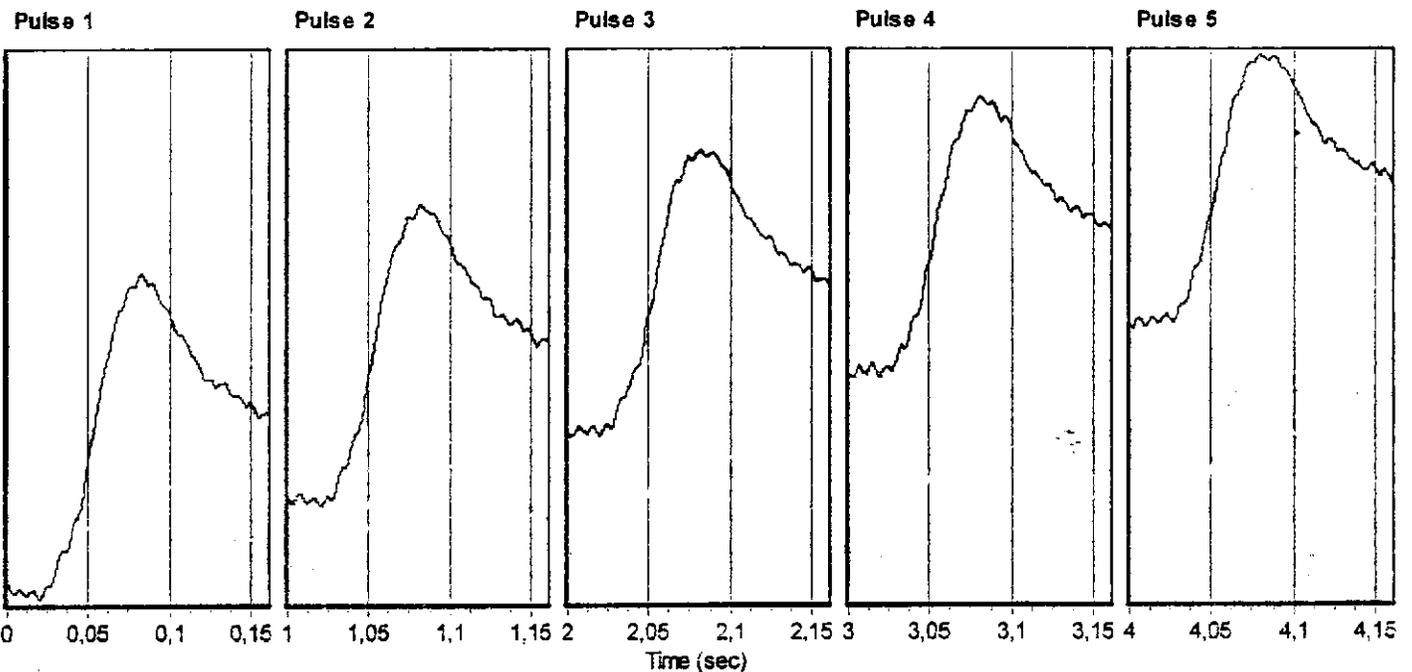
Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l defn/pulse (µm): 0,989500

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	3737	3518	3401	3394	3363	3483	137,83	3,96
Total recoverable horiz. deform. (µm)	2,47	2,63	2,72	2,72	2,74	2,65	0,10	3,79
Peak loading force (N)	909	910	910	909	909	910	0,53	0,06
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	0,92	1,01	1,12	1,10	1,16	1,06	0,09	8,02
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,55	1,62	1,60	1,62	1,59	1,59	0,03	1,59
Seating force (N)	91	91	91	91	91	91	0,15	0,16

— Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\NPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Default.D003

Template file name: C:\NPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\temp2.P003

Test date & time: 6/3/2012 10:03:29

Project: Leonardo

Operator: leda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 910
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: 7%mamona - CP I
 Remarks...

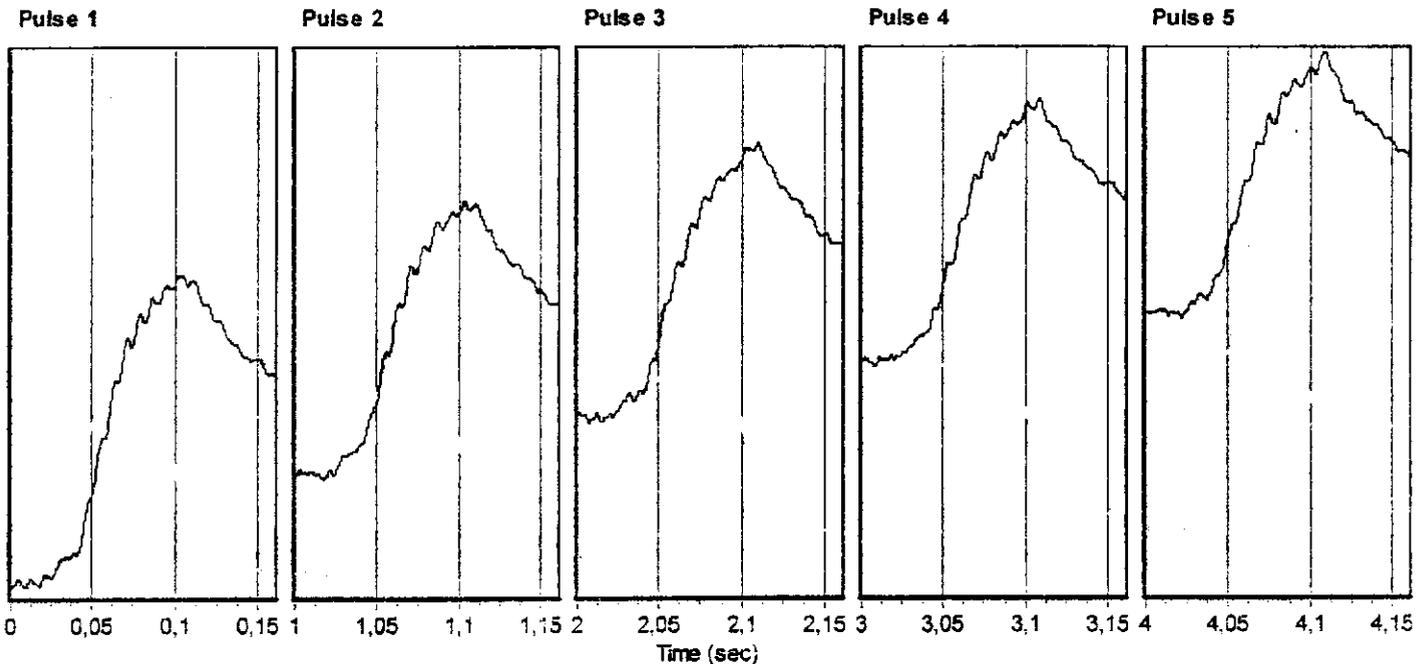
Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	65,5	65,4	65,5				65,5	0,1
Diameter (mm)	100,0	100,1	100,4				100,2	0,2
Cross-sectional area (mm ²): 7880,2								

Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4
 Perm't horiz'l defn/pulse (µm): 0,920100

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	3734	3481	3477	3438	3383	3503	120,92	3,45
Total recoverable horiz. deform. (µm)	2,49	2,67	2,67	2,71	2,74	2,66	0,09	3,26
Peak loading force (N)	909	908	908	909	906	908	1,19	0,13
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,52	1,65	1,73	1,73	1,75	1,68	0,09	5,13
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	0,97	1,02	0,94	0,98	0,99	0,98	0,03	2,61
Seating force (N)	91	91	91	91	91	91	0,14	0,15

— Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Leonardo\SBS - CP II - 2 leitura.D003

Template file name: C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Templates\temp2.P003

Test date & time: 6/3/2012 09:55:12

Project: Leonardo

Operator: leda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1415
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: SBS - CP II

Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	65,7	65,5	65,5				65,6	0,1
Diameter (mm)	100,0	99,8	100,0				99,9	0,1

Cross-sectional area (mm²): 7843,5

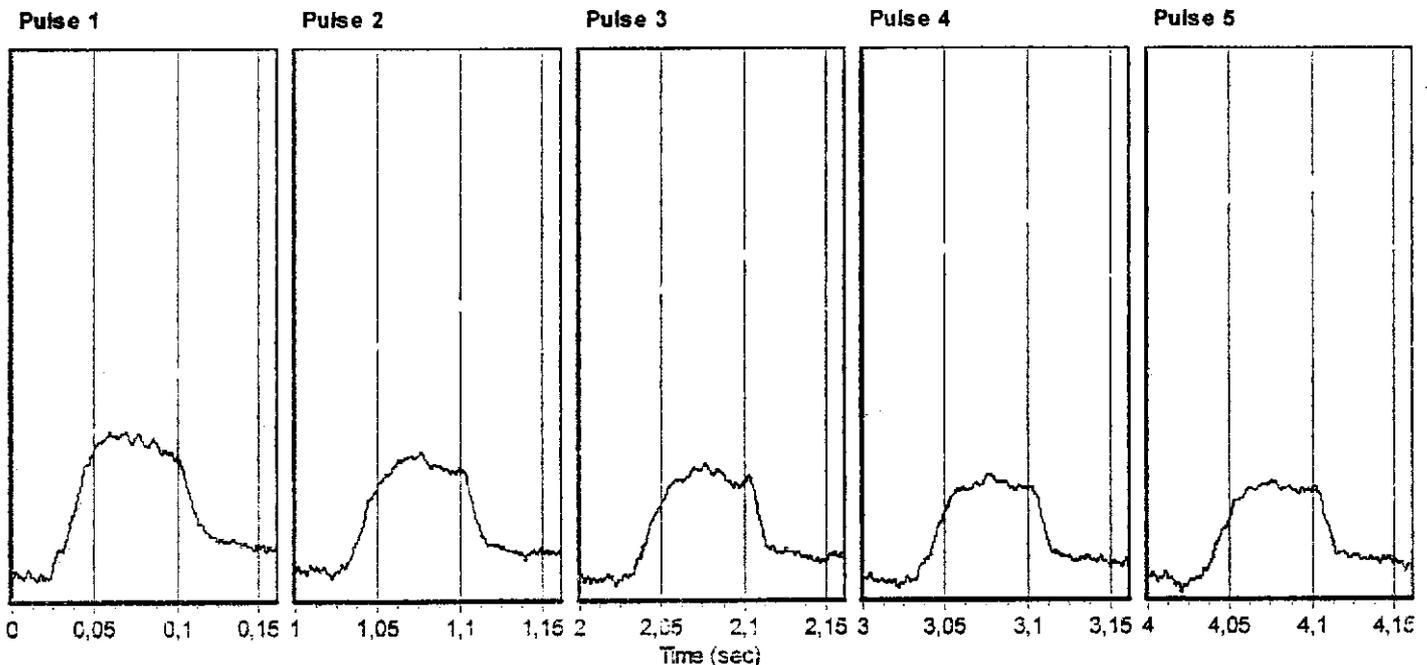
Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l def'n/pulse (µm): 0,545800

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	6099	5864	5844	6092	5820	5944	124,42	2,09
Total recoverable horiz. deform. (µm)	2,37	2,46	2,47	2,37	2,49	2,43	0,05	2,08
Peak loading force (N)	1413	1412	1413	1416	1416	1414	1,51	0,11
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,51	1,69	1,79	1,74	1,82	1,71	0,11	6,39
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	0,86	0,77	0,68	0,64	0,67	0,72	0,08	11,15
Seating force (N)	142	142	142	142	142	142	0,14	0,10

Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Leonardo\SBS - CP II.D003

Template file name: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\temp2.P003

Test date & time: 6/3/2012 09:54:23

Project: Leonardo

Operator: leda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1415
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: SBS - CP II

Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	65,7	65,5	65,5				65,6	0,1
Diameter (mm)	100,0	99,8	100,0				99,9	0,1

Cross-sectional area (mm²): 7843,5

Test Results

Conditioning pulses: 5

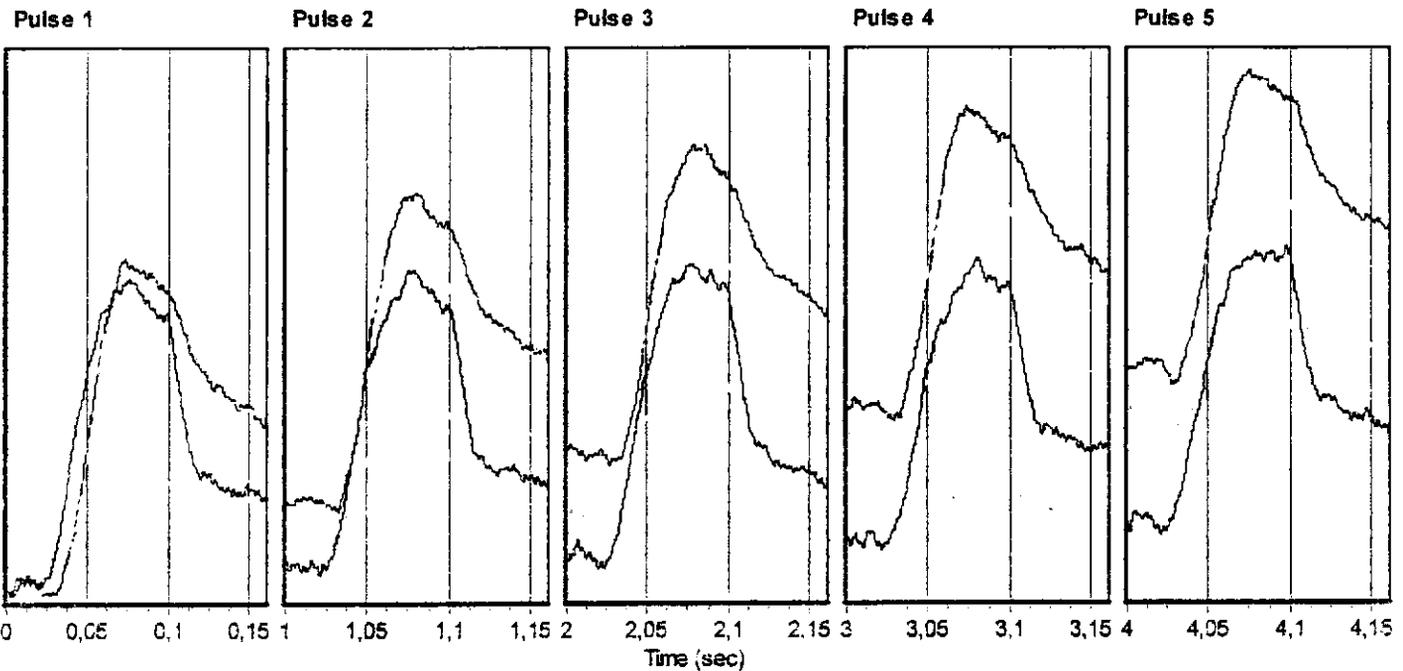
Perm't horiz'l def'n/pulse (µm): 0,488700

Core temperature (°C): 29,4

Skin temperature (°C): 29,4

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	6059	5876	5934	5865	5939	5935	68,91	1,16
Total recoverable horiz. deform. (µm)	2,39	2,46	2,44	2,47	2,44	2,44	0,03	1,17
Peak loading force (N)	1415	1417	1415	1415	1416	1416	0,76	0,05
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,20	1,26	1,28	1,35	1,37	1,29	0,06	4,66
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,18	1,20	1,15	1,12	1,07	1,14	0,05	4,27
Seating force (N)	142	141	141	141	141	141	0,15	0,10

— Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Leonardo\SBS - CP I - 2 leitura.D003
 Template file name: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\temp2.P003
 Test date & time: 6/3/2012 09:46:03

Project: Leonardo
 Operator: leda
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1415
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: SBS - CP I
 Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	66,3	66,1	66,0				66,1	0,2
Diameter (mm)	100,0	99,8	99,6				99,8	0,2

Cross-sectional area (mm²): 7822,6

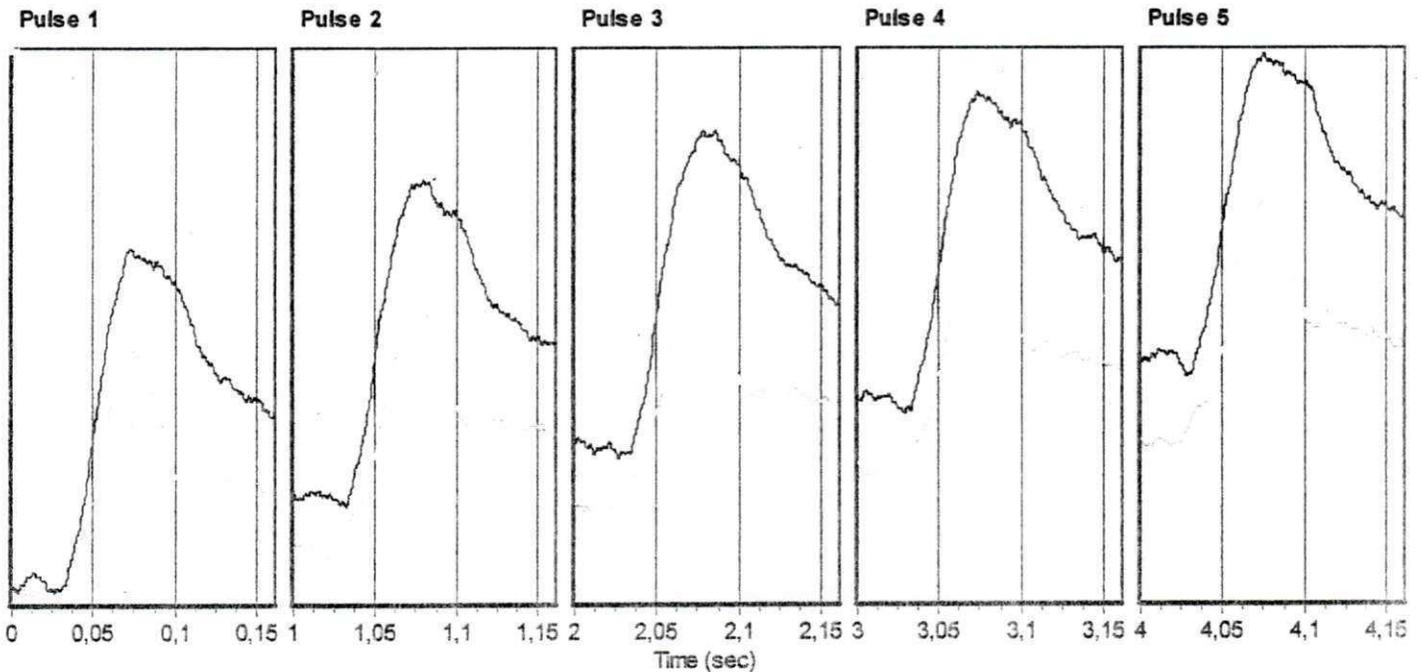
Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l def'n/pulse (µm): 0,746300

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	7941	7489	7296	7203	7497	7485	254,36	3,40
Total recoverable horiz. deform. (µm)	1,80	1,91	1,97	1,99	1,91	1,92	0,07	3,40
Peak loading force (N)	1412	1413	1416	1416	1417	1415	1,92	0,14
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	0,79	0,86	0,86	0,90	0,83	0,85	0,04	4,23
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,01	1,05	1,11	1,09	1,09	1,07	0,04	3,30
Seating force (N)	142	142	142	142	141	142	0,26	0,19

— Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\NPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Leonardo\SBS - CP I.D003

Template file name: C:\NPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Templates\temp2.P003

Test date & time: 6/3/2012 09:44:22

Project: Leonardo

Operator: leda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 50

Peak loading force (N): 1415
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: SBS - CP I

Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	66,3	66,1	66,0				66,1	0,2
Diameter (mm)	100,0	99,8	99,6				99,8	0,2

Cross-sectional area (mm²): 7822,6

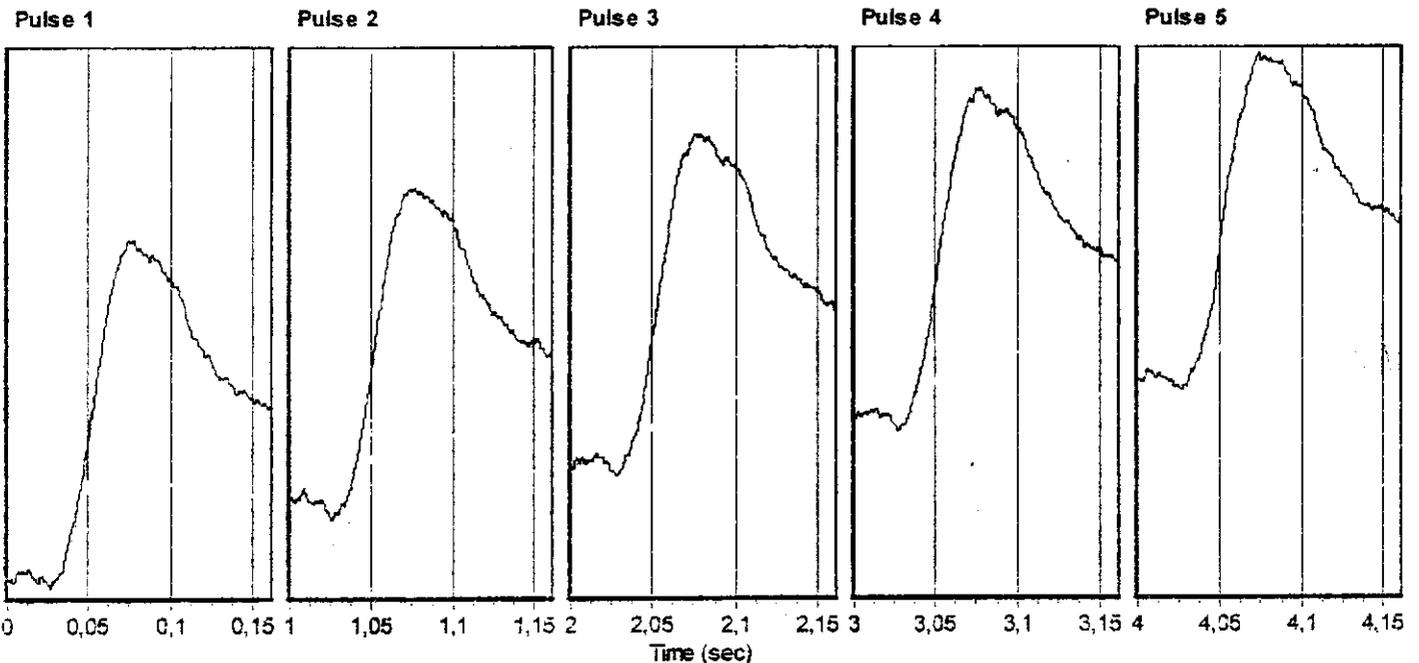
Test Results

Conditioning pulses: 50
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l def'n/pulse (µm): 0,646000

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	8171	7622	7723	7455	7603	7715	243,79	3,16
Total recoverable horiz. deform. (µm)	1,76	1,88	1,86	1,92	1,89	1,86	0,06	3,04
Peak loading force (N)	1416	1414	1415	1416	1415	1415	0,84	0,06
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	0,75	0,79	0,75	0,79	0,81	0,78	0,02	2,92
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,00	1,09	1,10	1,13	1,08	1,08	0,04	3,87
Seating force (N)	141	142	141	142	142	142	0,15	0,11

— Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\NPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\leonardo\CP 2 4_4.D003

Template file name: C:\NPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\temp2.P003

Test date & time: 10/2/2012 09:43:25

Project:

Operator: leda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 50

Peak loading force (N): 1093
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CP 2 4.4

Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	66,0	66,6	66,8				66,5	0,4
Diameter (mm)	99,8	99,6	100,0				99,8	0,2

Cross-sectional area (mm²): 7822,6

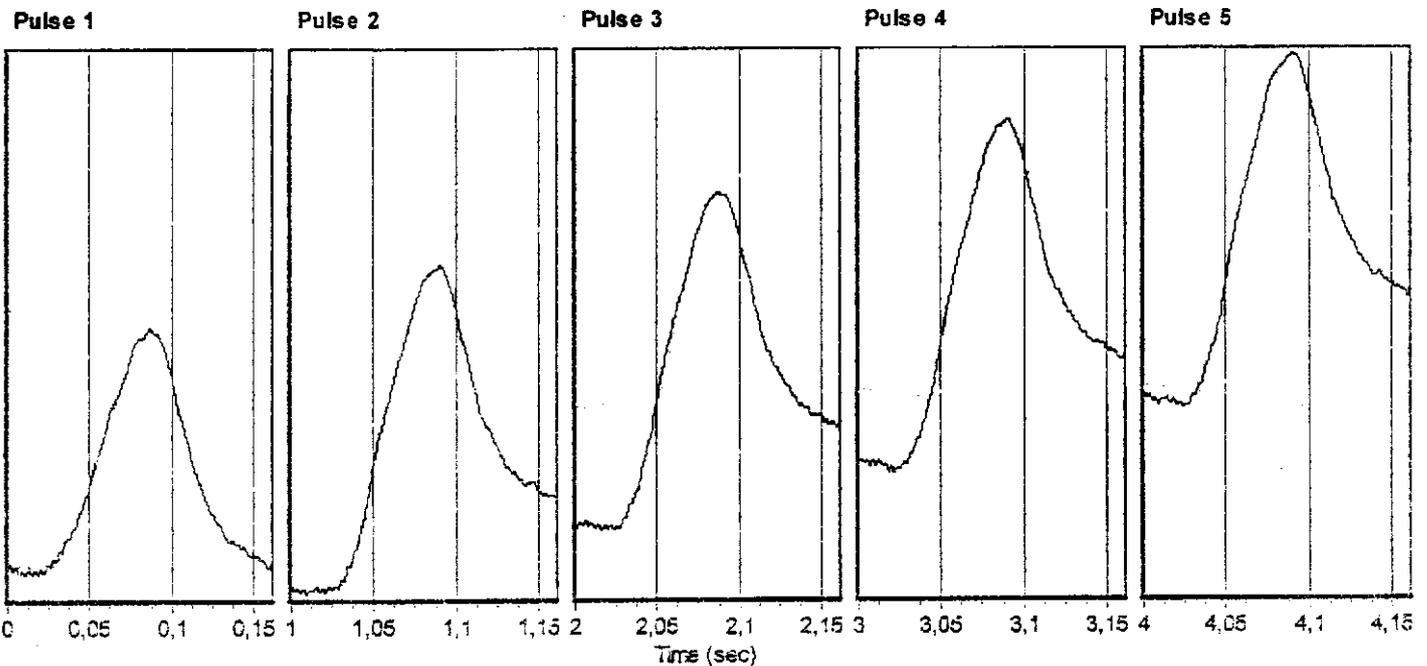
Test Results

Conditioning pulses: 50
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l def'n/pulse (µm): 1,061000

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	3650	3503	3446	3440	3373	3482	93,64	2,69
Total recoverable horiz. deform. (µm)	3,01	3,15	3,21	3,22	3,29	3,18	0,09	2,95
Peak loading force (N)	1090	1096	1099	1099	1100	1097	3,64	0,33
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,34	1,41	1,43	1,37	1,32	1,38	0,04	2,94
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,67	1,74	1,79	1,85	1,97	1,80	0,10	5,65
Seating force (N)	110	109	110	110	109	110	0,29	0,27

— Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: C:\NPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\leonardo\CP 2 4_4 3.D003
 Template file name: C:\NPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\temp2.P003
 Test date & time: 10/2/2012 09:46:03

Project:
 Operator: leda
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1093
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CP 2 4.4
 Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	66,0	66,6	66,8				66,5	0,4
Diameter (mm)	99,8	99,6	100,0				99,8	0,2

Cross-sectional area (mm²): 7822,6

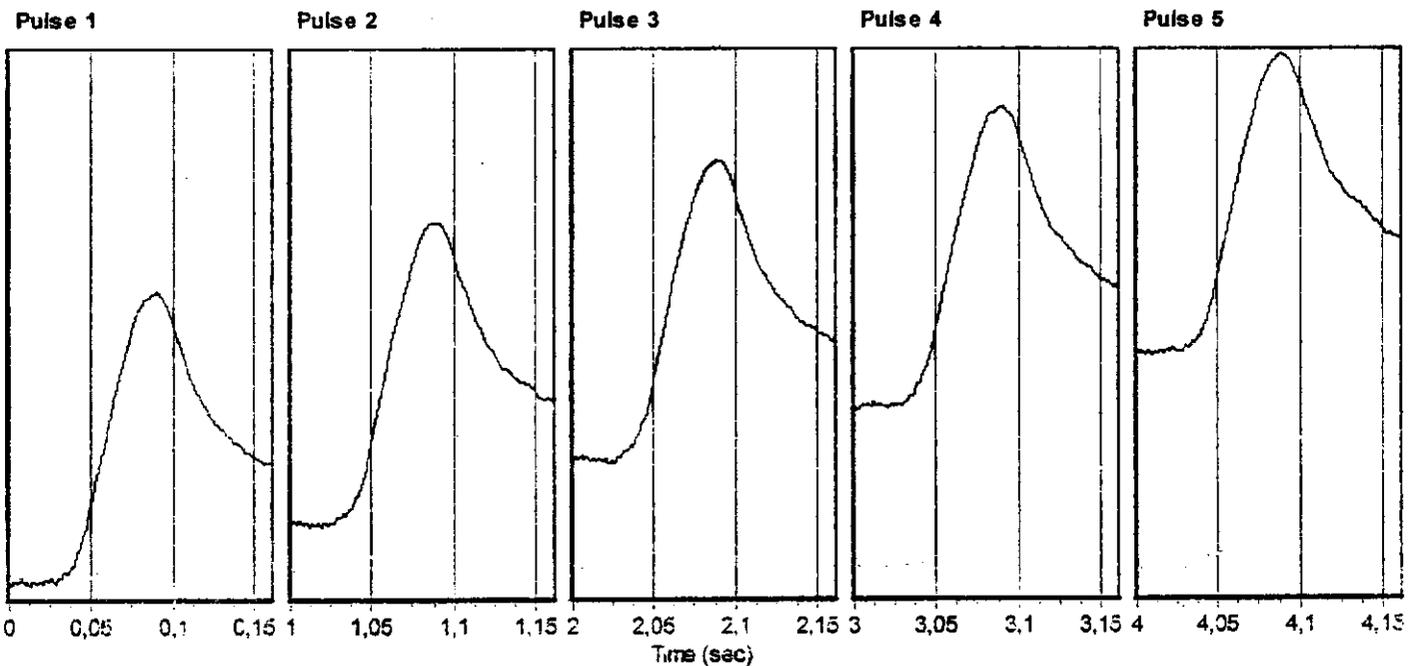
Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l def'n/pulse (µm): 1,014000

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	3643	3502	3363	3419	3427	3471	96,76	2,79
Total recoverable horiz. deform. (µm)	2,99	3,12	3,25	3,20	3,19	3,15	0,09	2,84
Peak loading force (N)	1080	1083	1083	1084	1083	1083	1,54	0,14
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,00	1,10	1,11	1,09	1,04	1,07	0,04	3,75
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,98	2,02	2,14	2,10	2,15	2,08	0,06	3,12
Seating force (N)	110	110	110	110	109	110	0,19	0,18

— Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\PCglobal UTS\003 IT Modulus Test\leonardo\CP 2 4_4 2.D003

Template file name: C:\PCglobal UTS\003 IT Modulus Test\temp2.P003

Test date & time: 10/2/2012 09:45:19

Project:

Operator: leda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1093
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CP 2 4.4

Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	66,0	66,6	66,8				66,5	0,4
Diameter (mm)	99,8	99,6	100,0				99,8	0,2

Cross-sectional area (mm²): 7822,6

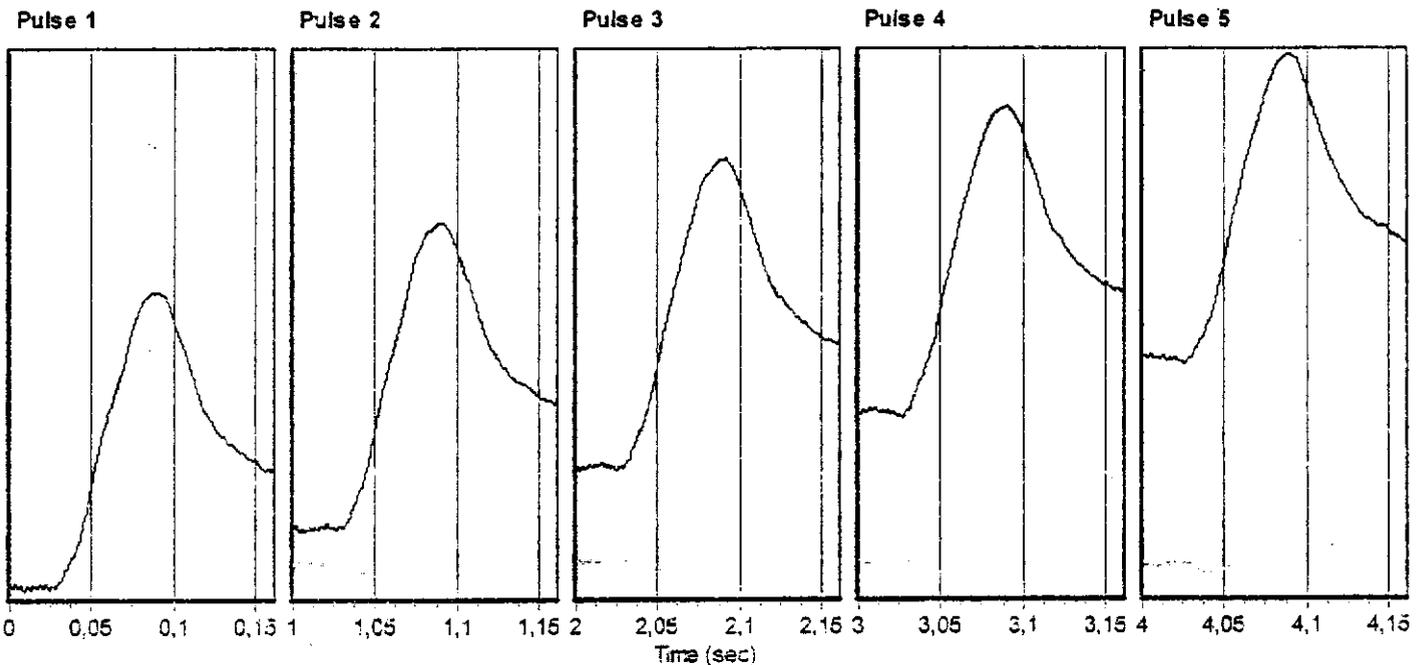
Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l def'n/pulse (µm): 1,093000

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	3607	3413	3331	3351	3353	3411	101,85	2,99
Total recoverable horiz. deform. (µm)	3,03	3,20	3,28	3,25	3,20	3,20	0,09	2,81
Peak loading force (N)	1083	1083	1083	1080	1081	1082	1,30	0,12
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	0,87	0,95	0,92	0,92	0,87	0,91	0,03	3,24
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	2,15	2,25	2,36	2,33	2,38	2,29	0,08	3,59
Seating force (N)	109	109	109	110	109	109	0,36	0,33

Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\leonardo\CP 1 4_4 2.D003

Template file name: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\temp2.P003

Test date & time: 10/2/2012 09:38:25

Project:

Operator: Ieda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1093
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CP 1 4.4

Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	67,1	66,8	66,7				66,9	0,2
Diameter (mm)	99,9	100,1	100,0				100,0	0,1

Cross-sectional area (mm²): 7854,0

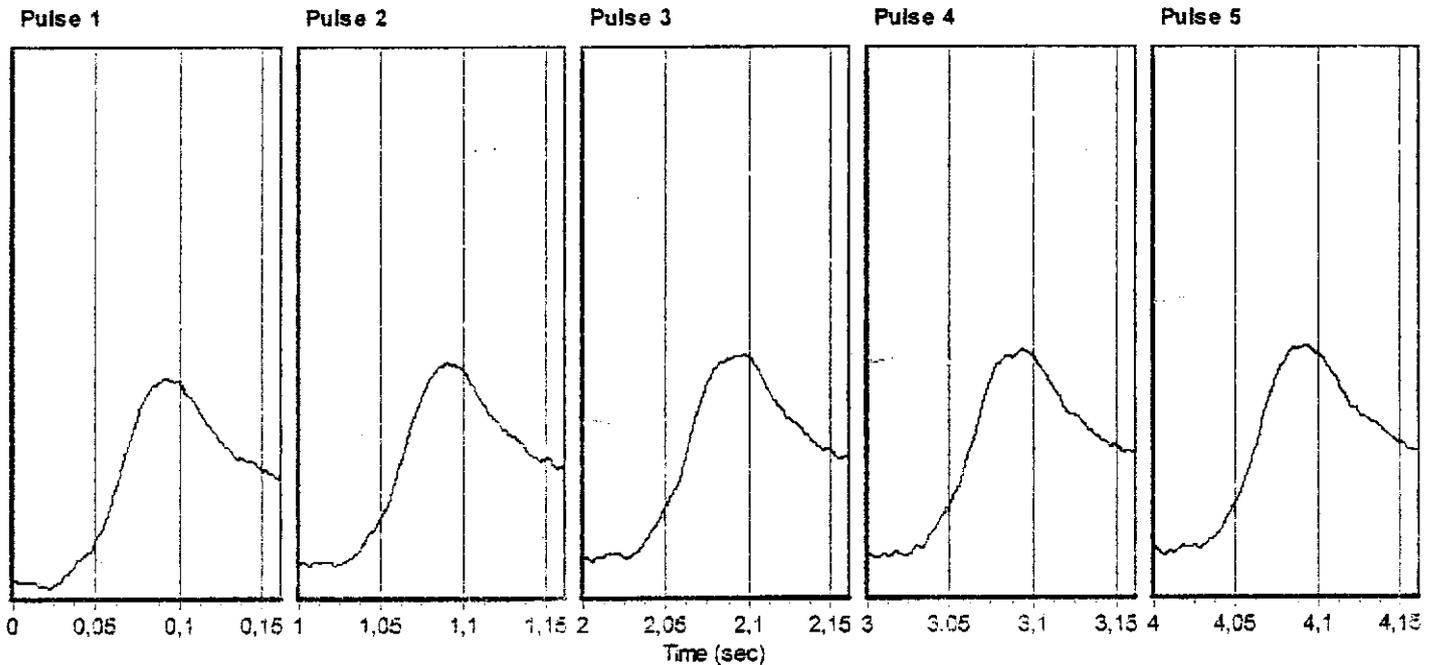
Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l defn/pulse (µm): 1,053000

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	4153	3901	3799	3761	3734	3869	152,48	3,94
Total recoverable horiz. deform. (µm)	2,57	2,77	2,84	2,87	2,89	2,79	0,12	4,16
Peak loading force (N)	1066	1079	1078	1077	1078	1075	4,93	0,46
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,22	1,37	1,40	1,44	1,44	1,38	0,08	5,99
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,35	1,40	1,44	1,43	1,45	1,41	0,03	2,47
Seating force (N)	109	109	109	110	109	109	0,10	0,09

Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\leonardo\CP 1 4_4.D003

Template file name: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\temp2.P003

Test date & time: 10/2/2012 09:36:37

Project:

Operator: leda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 50

Peak loading force (N): 1093
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CP 1 4.4

Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	67,1	66,8	66,7				66,9	0,2
Diameter (mm)	99,9	100,1	100,0				100,0	0,1

Cross-sectional area (mm²): 7854,0

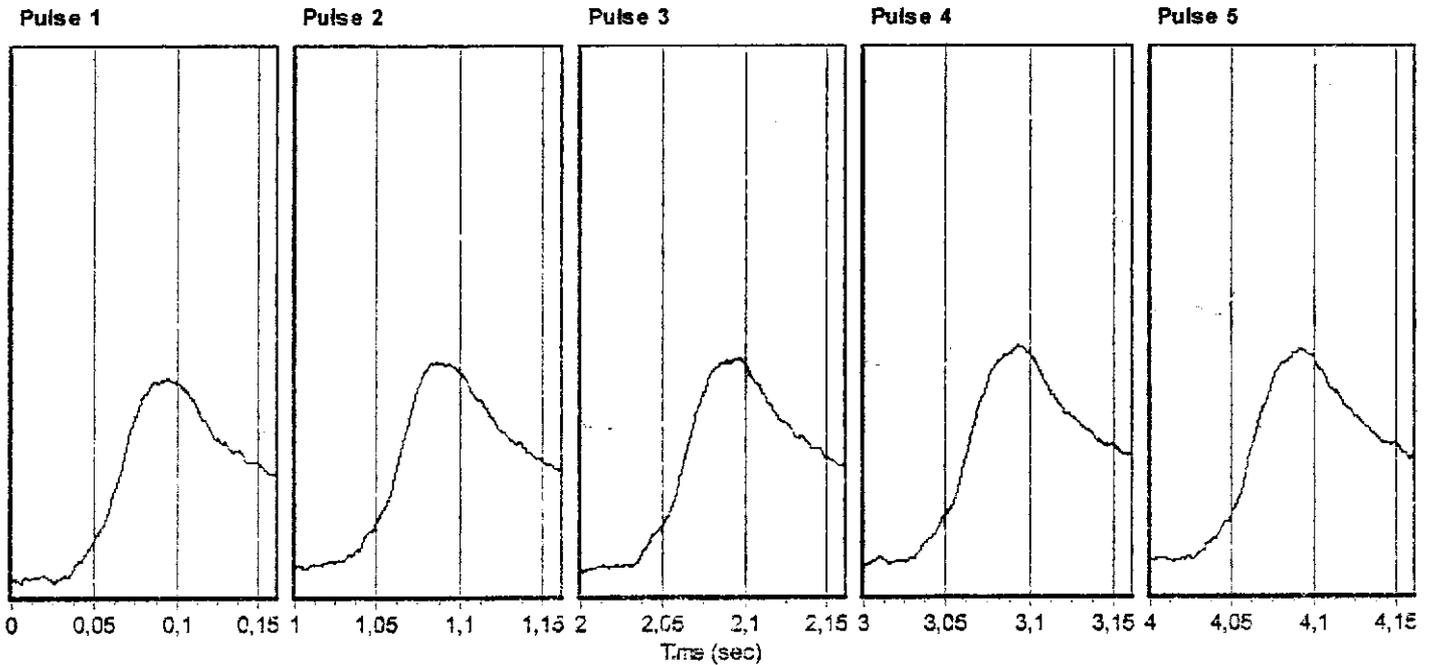
Test Results

Conditioning pulses: 50
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l def'n/pulse (µm): 0,963500

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	4358	3981	3994	3788	3875	3999	194,61	4,87
Total recoverable horiz. deform. (µm)	2,51	2,78	2,78	2,93	2,87	2,77	0,14	5,19
Peak loading force (N)	1091	1105	1107	1107	1109	1104	6,57	0,50
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,20	1,33	1,33	1,43	1,40	1,34	0,08	5,99
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,31	1,45	1,45	1,49	1,47	1,43	0,07	4,56
Seating force (N)	109	110	110	110	109	110	0,18	0,17

— Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. tvdts only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\NPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Leonardo\5% Mamona - CP II.D003

Template file name: C:\NPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\temp2.P003

Test date & time: 6/3/2012 09:30:55

Project: Leonardo

Operator: leda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1020
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: 5% Mamona - CP II
 Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	66,0	65,7	65,7				65,8	0,2
Diameter (mm)	99,7	100,0	99,6				99,8	0,2

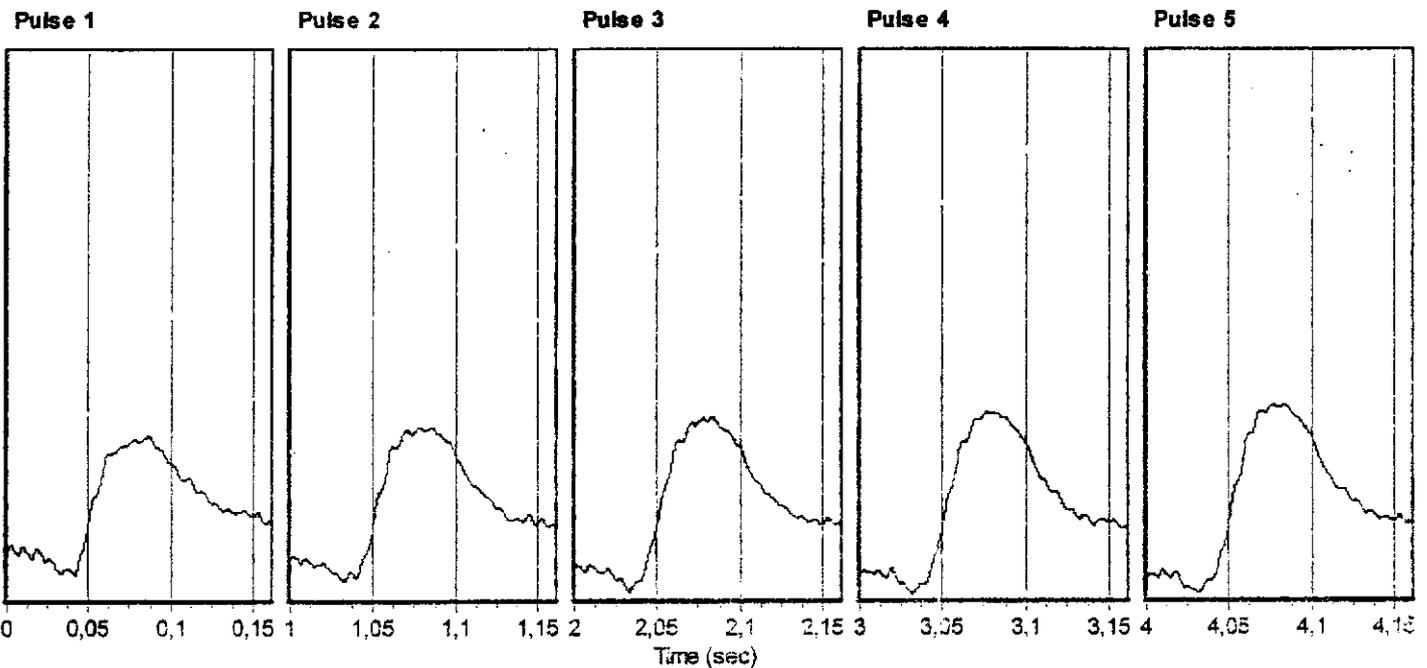
Cross-sectional area (mm²): 7817,4

Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4
 Perm't horiz'l def'n/pulse (µm): 0,885100

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	4567	4300	4191	4061	4031	4230	194,23	4,59
Total recoverable horiz. deform. (µm)	2,27	2,42	2,48	2,56	2,57	2,46	0,11	4,50
Peak loading force (N)	1019	1021	1021	1022	1019	1020	1,19	0,12
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,35	1,39	1,32	1,32	1,31	1,34	0,03	2,09
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	0,92	1,03	1,16	1,24	1,26	1,12	0,13	11,53
Seating force (N)	102	102	102	101	102	102	0,21	0,21

— Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Leonardo\5% -CP1 - 1leitura.D003

Template file name: C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Templates\temp2.P003

Test date & time: 6/3/2012 09:21:36

Project: Leonardo

Operator: Ieda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 50

Peak loading force (N): 1020
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: 5% Mamona - CP I

Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	65,7	66,0	65,8				65,8	0,2
Diameter (mm)	99,8	100,0	99,7				99,8	0,2

Cross-sectional area (mm²): 7827,8

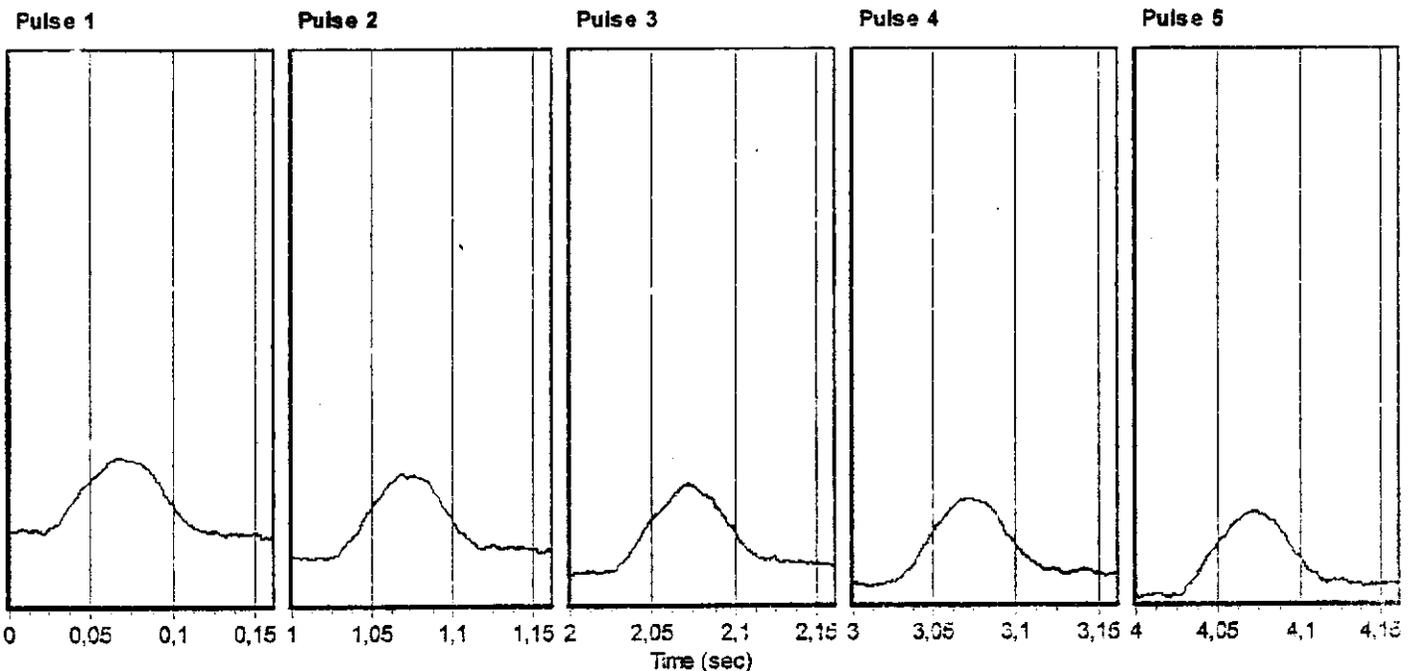
Test Results

Conditioning pulses: 50
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l defn/pulse (µm): 1,388000

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	3639	3521	3550	3454	3528	3538	59,62	1,68
Total recoverable horiz. deform. (µm)	2,85	2,94	2,92	3,00	2,93	2,93	0,05	1,71
Peak loading force (N)	1017	1018	1019	1019	1017	1018	0,58	0,06
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,58	1,66	1,69	1,76	1,75	1,69	0,07	3,98
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,27	1,29	1,23	1,24	1,19	1,24	0,03	2,81
Seating force (N)	102	102	101	102	102	102	0,26	0,26

— Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\NPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Leonardo\5% Mamona - CP I - leitura.D003

Template file name: C:\NPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\temp2.P003

Test date & time: 6/3/2012 09:24:05

Project: Leonardo

Operator: leda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1020
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: 5% Mamona - CP I

Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	65,7	66,0	65,8				65,8	0,2
Diameter (mm)	99,8	100,0	99,7				99,8	0,2

Cross-sectional area (mm²): 7827,8

Test Results

Conditioning pulses: 5

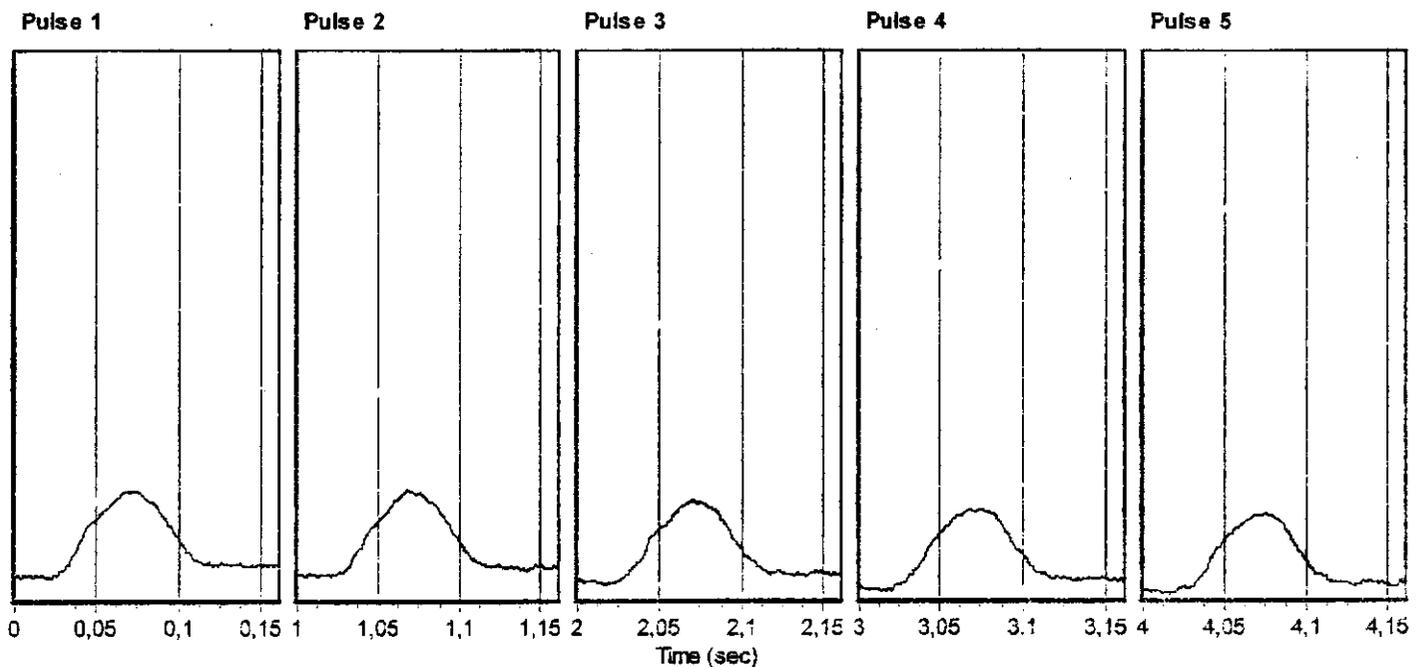
Perm't horiz'l def'n/pulse (µm): 1,592000

Core temperature (°C): 29,4

Skin temperature (°C): 29,4

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	3846	3604	3569	3526	3507	3610	122,42	3,39
Total recoverable horiz. deform. (µm)	2,69	2,88	2,90	2,94	2,96	2,88	0,10	3,34
Peak loading force (N)	1017	1019	1018	1019	1021	1019	1,10	0,11
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,79	1,89	1,96	2,02	1,99	1,93	0,08	4,25
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	0,90	0,99	0,95	0,92	0,97	0,94	0,03	3,40
Seating force (N)	103	102	101	102	102	102	0,44	0,43

— Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Leonardo\9%mamona - CP II - 2 leitura.D003

Template file name: C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Templates\temp2.P003

Test date & time: 16/3/2012 10:14:48

Project: Leonardo

Operator: leda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 735
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: 9%mamona - CP II

Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	66,9	66,1	66,1				66,4	0,5
Diameter (mm)	99,9	99,5	100,0				99,8	0,3

Cross-sectional area (mm²): 7822,6

Test Results

Conditioning pulses: 5

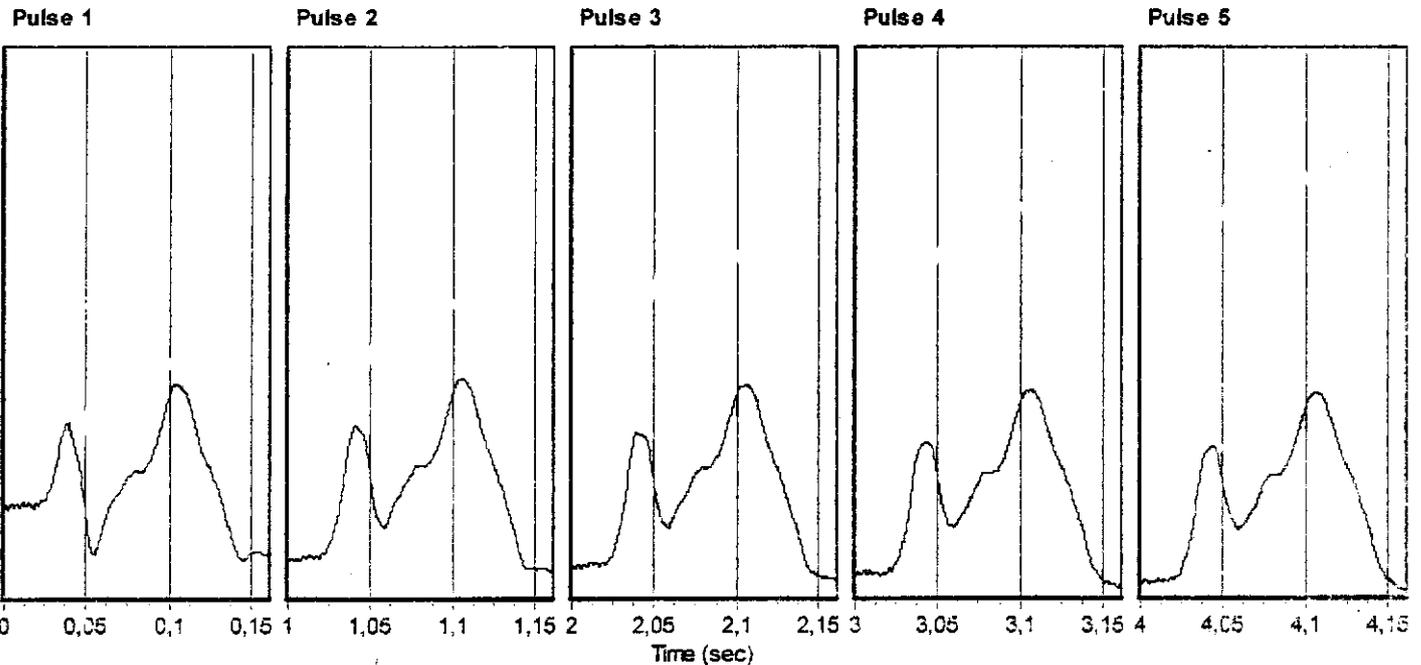
Perm't horiz'l def'n/pulse (µm): 1,836000

Core temperature (°C): 29,4

Skin temperature (°C): 29,4

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	2872	2642	2645	2616	2639	2683	95,10	3,54
Total recoverable horiz. deform. (µm)	2,59	2,83	2,84	2,87	2,85	2,80	0,10	3,64
Peak loading force (N)	738	742	744	743	744	742	2,27	0,31
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,19	1,21	1,12	1,12	1,08	1,14	0,05	4,16
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,41	1,63	1,72	1,75	1,77	1,65	0,13	8,03
Seating force (N)	73	74	73	74	74	73	0,40	0,55

— Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Leonardo\9%mamona - CP II.D003
 Template file name: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\temp2.P003
 Test date & time: 16/3/2012 10:05:40
 Project: Leonardo
 Operator: leda
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 50

Peak loading force (N): 735
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: 9%mamona - CP II
 Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	66,9	66,1	66,1				66,4	0,5
Diameter (mm)	99,9	99,5	100,0				99,8	0,3

Cross-sectional area (mm²): 7822,6

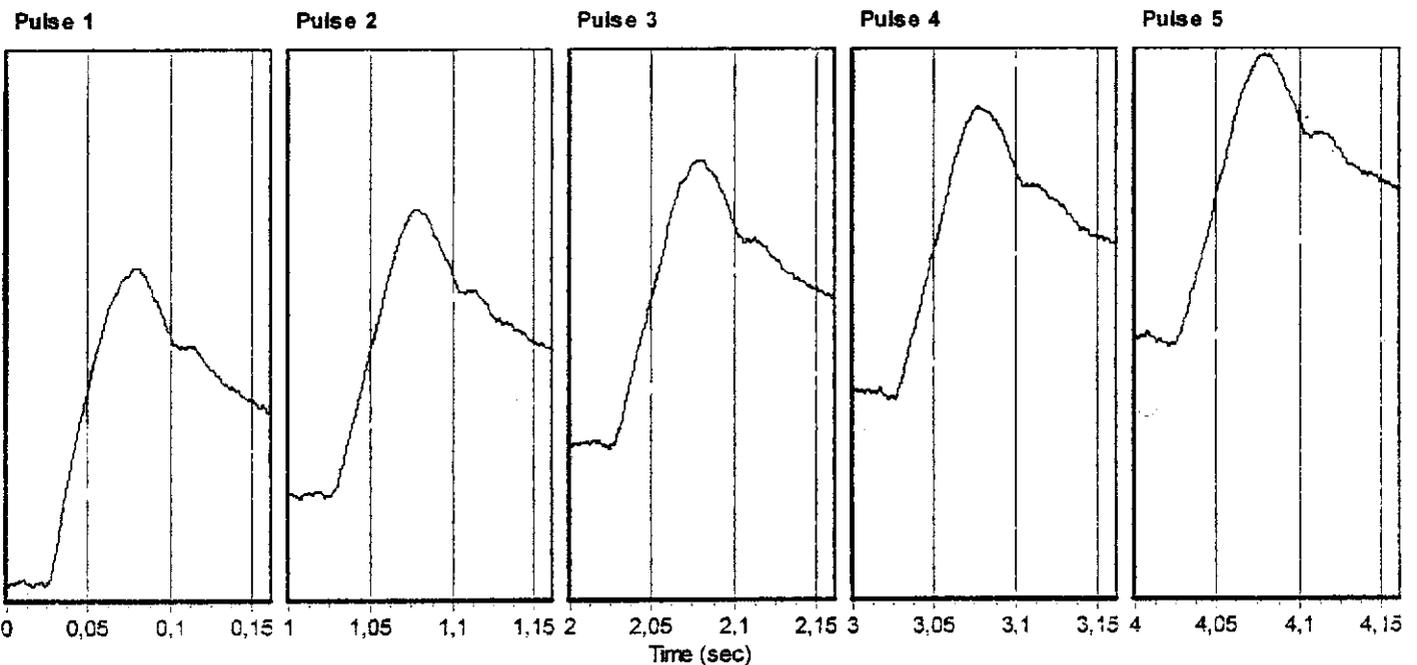
Test Results

Conditioning pulses: 50
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l def'n/pulse (µm): 1,521000

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	2359	2291	2255	2284	2230	2284	43,52	1,91
Total recoverable horiz. deform. (µm)	3,14	3,25	3,29	3,26	3,33	3,26	0,06	1,95
Peak loading force (N)	735	736	735	738	737	736	1,12	0,15
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,38	1,41	1,49	1,47	1,54	1,46	0,06	3,92
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,76	1,84	1,80	1,79	1,79	1,80	0,03	1,41
Seating force (N)	73	73	74	74	74	73	0,32	0,43

Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Leonardo\9%mamona - CP I - 2 leitura.D003

Template file name: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\temp2.P003

Test date & time: 16/3/2012 09:26:42

Project: Leonardo

Operator: leda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 735
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: 9%mamona - CP I
 Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	66,9	66,8	66,7				66,8	0,1
Diameter (mm)	100,3	99,9	99,8				100,0	0,3

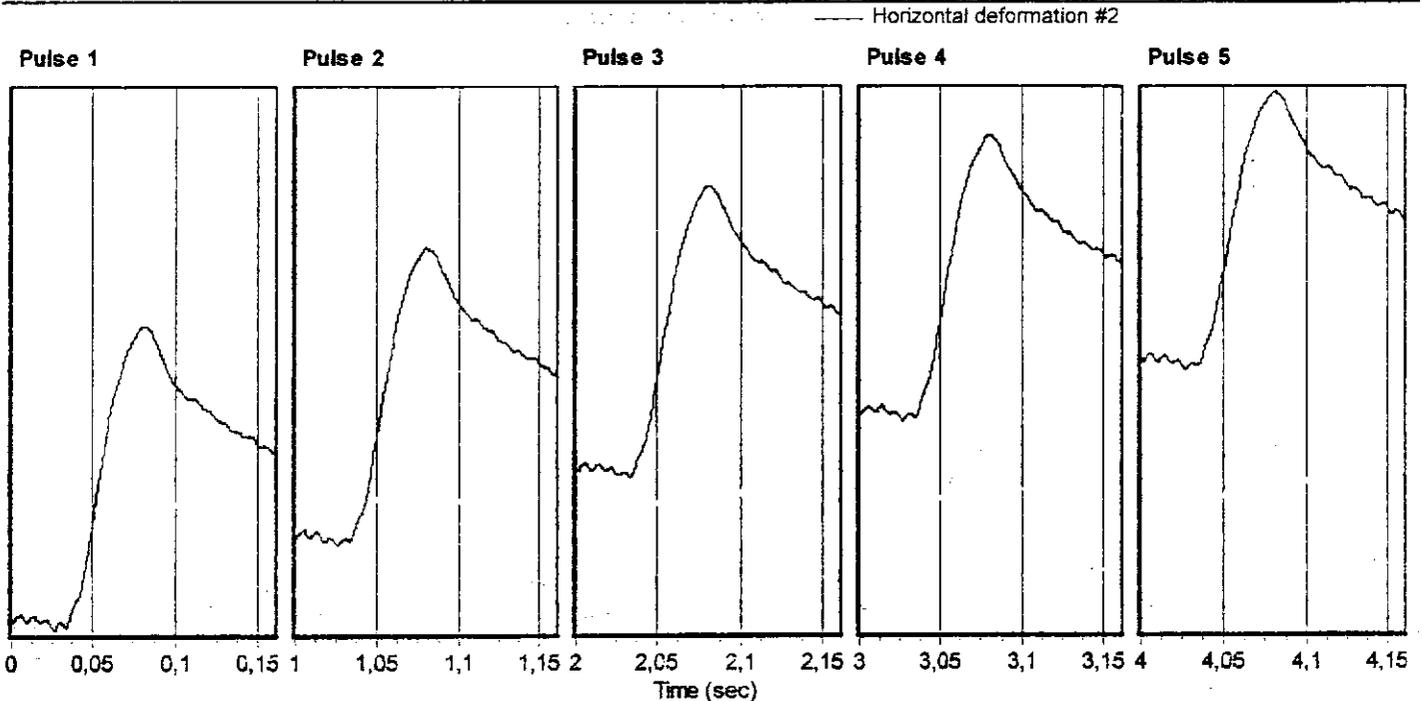
Cross-sectional area (mm²): 7854,0

Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l defn/pulse (µm): 1,674000

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	1624	1548	1535	1549	1560	1563	31,65	2,02
Total recoverable horiz. deform. (µm)	4,52	4,75	4,79	4,75	4,72	4,71	0,10	2,03
Peak loading force (N)	732	734	734	733	734	733	0,54	0,07
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,87	1,93	1,91	1,92	1,89	1,90	0,02	0,99
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	2,65	2,83	2,89	2,83	2,82	2,80	0,08	2,89
Seating force (N)	74	74	74	74	74	74	0,11	0,14



Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Leonardo\9%mamona - CP I.D003

Template file name: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\temp2.P003

Test date & time: 16/3/2012 09:25:41

Project: Leonardo

Operator: leda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 735
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: 9%mamona - CP I

Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	66,9	66,8	66,7				66,8	0,1
Diameter (mm)	100,3	99,9	99,8				100,0	0,3

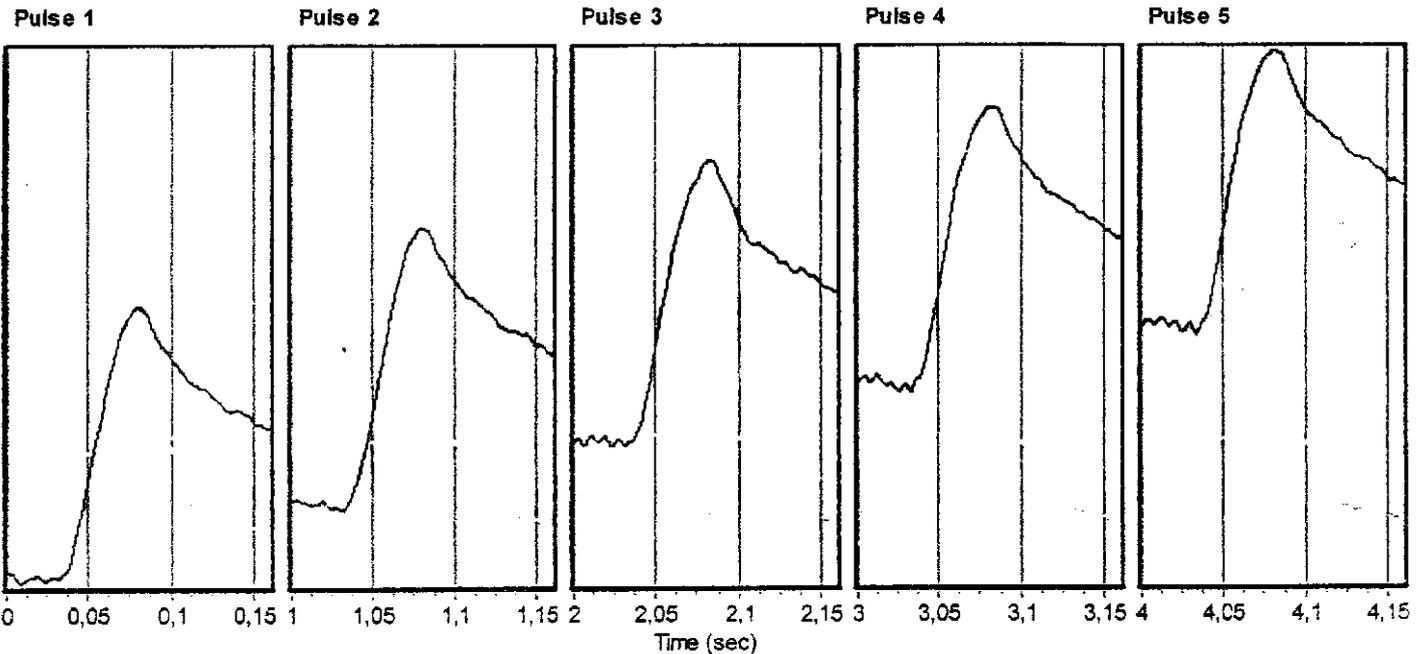
Cross-sectional area (mm²): 7854,0

Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4
 Perm't horiz'l defn/pulse (µm): 1,672000

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	1671	1580	1568	1594	1572	1597	38,01	2,38
Total recoverable horiz. deform. (µm)	4,40	4,66	4,70	4,62	4,68	4,61	0,11	2,36
Peak loading force (N)	733	733	734	735	734	734	0,67	0,09
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,89	1,82	1,83	1,78	1,75	1,81	0,05	2,56
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	2,51	2,83	2,87	2,84	2,94	2,80	0,15	5,23
Seating force (N)	73	73	73	73	73	73	0,28	0,36

— Horizontal deformation #2



Anexo C – Compactação por Amassamento (Superpave)

Constam as planilhas de cálculo para as misturas asfálticas resultante da compactação por amassamento (Superpave).

Devido Problemas com a máquina e o software, muitos relatório não foram impressos.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
 DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
 LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS
 AJUSTAGEM DE GRANULOMETRIA FAIXA C - DNIT

PENEIRAS	DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA - Bio Asfalto (CURVA INFERIOR)													
	BRITA 19		Brita 12,5		AREIA		PÓ DE PEDRA		FILLER		PROJETO	ESPECIFICAÇÃO		(mm)
	TOTAL	32%	TOTAL	29%	TOTAL	0%	TOTAL	39,0%	TOTAL	0%		PT. MED.	LIMITES	
1 1/2"	100,00	32,00	100,00	29,00	100,00	0,00	100,00	39,00	100,00	0,00	100,00	-	-	38,1
1"	100,00	32,00	100,00	29,00	100,00	0,00	100,00	39,00	100,00	0,00	100,00	-	-	25,4
3/4"	90,63	29,00	100,00	29,00	100,00	0,00	100,00	39,00	100,00	0,00	97,00	100	100	19,1
1/2"	54,02	17,29	98,55	28,58	100,00	0,00	100,00	39,00	100,00	0,00	84,87	80	100	12,7
3/8"	24,14	7,72	85,72	24,86	100,00	0,00	100,00	39,00	100,00	0,00	71,58	70	90	9,5
Nº 4	3,44	1,10	20,40	5,92	99,50	0,00	95,23	37,14	100,00	0,00	44	44	72	4,8
Nº 10	1,92	0,61	3,33	0,97	92,29	0,00	67,88	26,47	100,00	0,00	28,05	22	50	2
Nº 40	1,61	0,52	1,67	0,48	56,32	0,00	34,49	13,45	99,78	0,00	14,45	8	26	0,42
Nº 80	1,35	0,43	1,34	0,39	23,01	0,00	19,36	7,55	90,01	0,00	8,37	4	16	0,18
Nº 200	0,65	0,21	0,86	0,25	5,05	0,00	9,83	3,83	59,97	0,00	4,29	2	10	0,075

TAMANHO MÁXIMO

TAMANHO NOMINAL MÁXIMO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS
AJUSTAGEM DE GRANULOMETRIA FAIXA C - DNIT

PENEIRAS	DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA - FAIXA INTERMEDIÁRIA													
	BRITA 19		Brita 12,5		AREIA		PÓ DE PEDRA		FILLER		PROJETO	ESPECIFICAÇÃO		(mm)
	TOTAL	19%	TOTAL	27%	TOTAL	9%	TOTAL	45,0%	TOTAL	0%		PT. MED.	LIMITES	
1 1/2"	100,00	19,00	100,00	27,00	100,00	9,00	100,00	45,00	100,00	0,00	100,00	-	-	38,1
1"	100,00	19,00	100,00	27,00	100,00	9,00	100,00	45,00	100,00	0,00	100,00	-	-	25,4
3/4"	90,63	17,22	100,00	27,00	100,00	9,00	100,00	45,00	100,00	0,00	98,22	100	100	19,1
1/2"	54,02	10,26	98,55	26,61	100,00	9,00	100,00	45,00	100,00	0,00	90,87	80	100	12,7
3/8"	24,14	4,59	85,72	23,14	100,00	9,00	100,00	45,00	100,00	0,00	81,73	70	90	9,5
Nº 4	3,44	0,65	20,40	5,51	99,50	8,96	95,23	42,85	100,00	0,00	57,97	44	72	4,8
Nº 10	1,92	0,36	3,33	0,90	92,29	8,31	67,88	30,55	100,00	0,00	40,12	22	50	2
Nº 40	1,61	0,31	1,67	0,45	56,32	5,07	34,49	15,52	99,78	0,00	21,35	8	26	0,42
Nº 80	1,35	0,26	1,34	0,36	23,01	2,07	19,36	8,71	90,01	0,00	11,40	4	16	0,18
Nº 200	0,65	0,12	0,86	0,23	5,05	0,45	9,83	4,42	59,97	0,00	5,23	2	10	0,075

TAMANHO MÁXIMO

TAMANHO NOMINAL MÁXIMO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
 DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
 LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS
 AJUSTAGEM DE GRANULOMETRIA FAIXA C - DNIT

PENEIRAS	DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA - Bio Asfalto (FAIXA SUPERIOR)													
	BRITA 19		Brita 12,5		AREIA		PÓ DE PEDRA		FILLER		PROJETO	ESPECIFICAÇÃO		(mm)
	TOTAL	23%	TOTAL	21%	TOTAL	22%	TOTAL	34,0%	TOTAL	0%		PT. MED.	LIMITES	
1 1/2"	100,00	23,00	100,00	21,00	100,00	22,00	100,00	34,00	100,00	0,00	100,00	-	-	38,1
1"	100,00	23,00	100,00	21,00	100,00	22,00	100,00	34,00	100,00	0,00	100,00	-	-	25,4
3/4"	90,63	20,84	100,00	21,00	100,00	22,00	100,00	34,00	100,00	0,00	97,84	100	100	19,1
1/2"	54,02	12,42	98,55	20,70	100,00	22,00	100,00	34,00	100,00	0,00	89,12	80	100	12,7
3/8"	24,14	5,55	85,72	18,00	100,00	22,00	100,00	34,00	100,00	0,00	79,55	70	90	9,5
Nº 4	3,44	0,79	20,40	4,28	99,50	21,89	95,23	32,38	100,00	0,00	59,34	44	72	4,8
Nº 10	1,92	0,44	3,33	0,70	92,29	20,30	67,88	23,08	100,00	0,00	44,52	22	50	2
Nº 40	1,61	0,37	1,67	0,35	56,32	12,39	34,49	11,73	99,78	0,00	24,84	8	26	0,42
Nº 80	1,35	0,31	1,34	0,28	23,01	5,06	19,36	6,58	90,01	0,00	12,24	4	16	0,18
Nº 200	0,65	0,15	0,86	0,18	5,05	1,11	9,83	3,34	59,97	0,00	4,78	2	10	0,075

TAMANHO MÁXIMO

TAMANHO NOMINAL MÁXIMO

PENEIRAS	DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA - Bio Asfalto					SOMA	959,7		
	BRITA 19	BRITA 12,5	AREIA	PÓ DE PEDRA	FULLER			SOMA + FI	999,7
	320	290	0	390	0				
Granulometria por peneiramento inferior									
	PESO(G)	%AMOSTRA TOTAL	% ACUMULADA	% QUE PASSA AMOSTRA TOTAL					
1 1/2"									
1"									
3/4"	51,32	5,132	5,132	94,868					
1/2"	106,98	10,698	15,83	84,17					
3/8"	81	8,1	23,93	76,07					
Nº 4	301,5	30,15	54,08	45,92					
Nº 10	178,41	17,841	71,921	28,079					
Nº 40	141,8	14,18	86,101	13,899					
Nº 80	58,6	5,86	91,961	8,039					
Nº 200	40,1	4,01	95,971	4,029					

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
 DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
 LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS
 AJUSTAGEM DE GRANULOMETRIA FAIXA C - DNIT
CURVA REAL LIMITE SUPERIOR

PENEIRAS	DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA - Bio Asfalto					SOMA	953,07
	BRITA 19	BRITA 12,5	AREIA	PÓ DE PEDRA	FULLER		
	230	210	220	340	0		
Granulometria por peneiramento							
	PESO(G)	%AMOSTRA TOTAL	% ACUMULADA	% QUE PASSA AMOSTRA TOTAL		SOMA + F	999,46
1 1/2"							
1"							
3/4"	51,39	5,139	5,139		94,861		
1/2"	57,9	5,79	10,929		89,071		
3/8"	79,14	7,91	18,84		81,16		
Nº 4	222,69	22,27	41,11		58,89		
Nº 10	151,29	15,13	56,24		43,76		
Nº 40	191,00	19,10	75,34		24,66		
Nº 80	129,9	12,99	88,33		11,67		
Nº 200	69,76	6,98	95,31		4,69		
Passante 200 =	46,39						

- Faixa Inferior-Bio Asfalto-

DESCRÇÃO	RELAÇÃO	RESULTADOS								
		8 Giros-	8 Giros -CP2	8 Giros - média	100 Giros - CP1	100 Giros -	100 Giros - média	160 Giros -CP1	160 Giros -CP2	160 Giros -média
Teor de Ligante do Grupo (%)	5,2									
Desidade Máxma Teórica - DMT	2,455									
Massa Seca -MS (g)	-	1195,2	1197,8	1196,5	1200	1194,7	1197,35	1200	1200	1200
Massa Submersa - Ms sub (g)	-	671,1	674,3	672,70	693,4	695	694,20	698,1	697,4	697,75
Volume - V	MS (g) - Ms sub (g)	524,1	523,5	523,80	506,8	499,7	503,15	501,9	502,8	502,25
Média das alturas		75,17	73,53	74,35	67,17	66,73	66,95	66,8	66,5	66,65
Média dos diâmetros		100,03	99,8	99,92	99,47	99,87	99,67	99,5	99,93	99,72
Vmx	$(\pi \cdot d^2 \cdot h) / 4 \cdot 0,001$	590,74	575,20	582,97	521,98	522,74	522,36	519,41	521,56	520,49
Densidade (estimada) - Gmb	MS (g) / Vmx	2,02	2,08	2,05	2,30	2,29	2,29	2,31	2,30	2,31
Coefficiente de correção	Gmb(medida)/Gmb(estimada) -	1,00	1,00	1,04	1,00	1,00	1,04	1,00	1,00	1,04
Gmb (corrigida)	Cx Gmbn(estimada)	2,10	2,16	2,13	2,38	2,37	2,38	2,39	2,39	2,39
Volume de Vazios -Vv	(100-%Gmm)	14,59	12,09	13,34	2,94	3,51	3,23	2,60	2,73	2,67
Vazios do Agregado Mineral - VAM	$(100 - \{mm\} \cdot N_{projeto} \cdot G_{mm} \cdot X_{Pag}) / G_{SB}$	25,22	23,03	24,13	15,03	15,53	15,28	14,73	14,84	14,79
Relação das Betume/Vazios -RBV	VAMestimado-4/VAMest	82,69	81,32	82,00	73,57	74,32	73,94	73,09	73,28	73,19
%Gmm		85,41	87,91	86,66	97,06	96,49	96,77	97,40	97,27	97,33
Densidade medida	MM/Vs	2,28	2,29	2,28	2,37	2,39	2,38	2,39	2,39	2,39
Porcentagem de agregado		0,948	0,948	0,948	0,948	0,948	0,948	0,948	0,948	0,948
Gsb		2,658	2,658	2,66	2,658	2,658	2,59	2,658	2,658	2,66
PI(estimado)	$PII - [0,4 \cdot (4 - VV)]$	9,43	8,43	8,93	4,78	5,01	4,89	4,64	4,69	4,67
Cc		0,20	0,20	0,20	0,10	0,10	0,00	0,10	0,10	0,10
Vam estimado	VAM+C*(4-Vv)	23,10	21,41	22,26	15,13	15,58	15,35	14,87	14,97	14,92
%Gmmestimada@	$\%Gmm_{tent@inicial} - (4 - Vv)$	84,84	87,14	85,89	96,00	96,00	96,00	96,63	96,49	96,56
Ple estimado	$(-Pag \cdot GI) / (Gse - Gsb) / (Gsex \cdot Gsb) + PI$	9,42	8,42	8,92	4,77	5,00	4,88	4,63	4,68	4,66
Gse		2,659	2,659	2,66	2,659	2,659	0,00	2,659	2,659	2,66
P/A		0,43	0,49	0,46	0,86	0,82	0,84	0,88	0,87	0,88

Dados		
Material	Densidade Real	% Mistura
Pó de	2,59	36,97
Brita nº 19	2,77	30,34
Brita nº 12,5	2,64	27,49
CAP	1,02	5,20
DMT		
2,455		

- Faixa Intermediária-Bio Asfalto-

Teor de Ligante do Grupo (%) 5,3

Desidade Máxima Teórica - DMT 2,436

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)	-	1199,5	1198,1	1198,8	1196,1	1195,6	1195,85	1198,6	1198,7	1198,65
Massa Submersa - Ms sub (g)	-	663,5	661,2	662,35	693,2	693,4	693,30	697,9	701,8	699,85
Volume - V	MS (g) - Ms sub (g)	536	536,9	536,45	502,9	502,2	502,55	500,7	496,9	498,80
Média das alturas		71,3	71,07	71,185	66,03	65,43	65,73	64,4	64,47	64,44
Média dos diâmetros		99,77	99,67	99,72	99,83	99,8	99,82	99,9	99,97	99,94
Vmx	$(\pi \cdot d^2 \cdot h) / 4 \cdot 0,001$	557,42	554,51	555,9615266	516,84	511,83	514,34	504,79	506,04	505,42
Densidade (estimada) - Gmb	MS (g) / Vmx	2,15	2,16	2,1562758	2,31	2,34	2,33	2,37	2,37	2,37
Coefficiente de correção	Gmb(medida)/Gmb(estimada) -	1,01	1,01	1,013275305	1,01	1,01	1,01	1,01	1,02	1,01
Gmb (corrigida)	Cx Gmbn(estimada)	2,18	2,19	2,184901019	2,34	2,37	2,36	2,39	2,41	2,40
Volume de Vazios -Vv	(100-%Gmm)	10,50	10,13	10,32	3,75	2,84	3,30	1,74	0,98	1,36
Vazios do Agregado Mineral - VAM	$(100 - \text{mm} \cdot \text{Nprojeto} \cdot \text{Gmm} \cdot \text{XPag}) / \text{GSB}$	21,40	21,08	21,24	15,47	14,68	15,07	13,70	13,04	13,37
Relação das Betume/Vazios -RBV	VAMestimado/4/VAMest	80,10	79,85	79,97	74,18	72,96	73,57	71,29	70,01	70,65
%Gmm		89,50	89,87	89,68	96,25	97,16	96,70	98,26	99,02	98,64
Densidade medida	MM/Vs	2,24	2,23	2,23	2,38	2,38	2,38	2,39	2,41	2,40
Porcentagem de agregado		94,700	94,700	94,700	94,700	94,700	94,700	94,700	94,700	94,700
Gsb		2,627	2,627	2,627	2,627	2,627	2,627	2,627	2,627	2,627
PI(estimado)	$PII - [0,4 \cdot (4 - VV)]$	7,90	7,75	7,83	5,20	4,84	5,02	4,40	4,09	4,24
Cc		0,20	0,20	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Vam estimado	VAM+C*(4-Vv)	20,10	19,85	19,97	15,49	14,79	15,14	13,93	13,34	13,84
%Gmmestimada@	%Gmm,tent@inicial-(4-Vv)	88,80	89,16	88,98	96,00	96,00	96,00	97,56	98,32	97,94
Ple estimado	$(-[\text{Pag} \cdot \text{G}]) / (\text{Gse} - \text{Gsb}) / (\text{Gse} \cdot \text{Gsb}) + \text{PI}$	7,83	7,39	7,83	5,20	4,84	5,02	4,40	4,09	4,24
Gse		2,632	2,632	2,632	2,632	2,632	2,632	2,632	2,632	2,632
PIA		0,72	0,76	0,74	1,08	1,16	1,12	1,27	1,37	1,32

Dados		
Material	Densidade Real	% Mistura
Pó de	2,59	42,6
Areia	2,65	8,52
Brita nº 19	2,77	17,99
Brita nº 12,5	2,64	25,57
CAP	1,02	5,30
Filler		
DMT		
2,436		

- Faixa Superior-Bio Asfalto-

Teor de Ligante do Grupo (%)		4,5								
Desidade Máxima Teórica - DMT		2,435								
DESCRIÇÃO	RELAÇÃO	RESULTADOS								
		8 Giros-	8 Giros - CP2	8 Giros - média	100 Giros - CP1	100 Giros -	100 Giros - média	160 Giros - CP1	160 Giros -CP2	160 Giros -média
Massa Seca -MS (g)	-	1197,7	1200	1198,85	1198	1198,1	1198,05	1199,6	1199,8	1199,7
Massa Submersa - Ms sub (g)	-	653,7	657,3	655,50	688,7	691,7	690,20	695,6	693,6	694,60
Volume - V	MS (g) - Ms sub (g)	544	542,7	543,35	509,3	506,4	507,85	504	506,2	505,10
Média das alturas		71,3	70,93	71,12	66,33	66,2	66,27	65,4	65,97	65,69
Média dos diâmetros		99,83	99,77	99,80	99,77	99,87	99,82	99,83	99,67	99,75
Vmx	$(\pi \cdot d^2 \cdot hx) / 4 \cdot 0,001$	558,09	554,52	556,31	518,56	518,58	518,57	511,91	514,71	513,31
Densidade (estimada) - Gmb	MS (g) / Vmx	2,15	2,16	2,16	2,31	2,31	2,31	2,34	2,33	2,34
Coefficiente de correção	Gmb(medida)/Gmb(estimada) -	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
Gmb (corrigida)	Cx Gmbn(estimada)	2,18	2,20	2,19	2,35	2,35	2,35	2,38	2,37	2,38
Volume de Vazios -Vv	(100-%Gmm)	10,43	9,68	10,05	3,58	3,57	3,58	2,25	2,66	2,45
Vazios do Agregado Mineral - VAM	$(100 - \text{mm} @ \text{Nprojeto} \times \text{Gmm} \times \text{Pag}) / \text{GSB}$	20,45	19,78	20,11	14,36	14,36	14,36	13,18	13,54	13,36
Relação das Betume/Vazios -RBV	VAMestimado-4/VAMest	79,12	78,55	78,84	72,23	72,22	72,23	70,05	70,76	70,40
%Gmm		89,57	90,32	89,95	96,42	96,43	96,42	97,75	97,34	97,55
Densidade medida	MMVs	2,20	2,21		2,35	2,37		2,38	2,37	2,38
Porcentagem de agregado		0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,96
Gsb		2,618	2,618		2,618	2,618		2,618	2,618	2,62
PI(estimado)	$PII - [0,4 \cdot (4 - Vv)]$	7,07	6,77	6,92	4,33	4,33	4,33	3,80	3,96	3,88
Cc		0,20	0,20	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Vam estimado	VAM+C*(4-Vv)	19,16	18,65	18,90	14,40	14,40	14,40	13,36	13,68	13,52
%Gmmestimada@	%Gmm.tent@inicial-(4-Vv)	89,15	89,90	89,52	96,00	96,00	96,00	97,33	96,92	97,12
Ple estimado	$(- \text{Pag} \cdot \text{GI}) / (\text{Gse} - \text{Gsb}) / (\text{Gsex} \cdot \text{Gsb}) + \text{PI}$	6,90	6,60	6,75	4,16	4,16	4,16	3,63	3,79	3,71
Gse		2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63
PIA		0,68	0,71	0,69	1,13	1,13	1,13	1,29	1,24	1,26

Dados		
Material	Densidade Real	% Mistura
Pó de	2,53	32,47
Areia	2,606	21,01
Brita nº 19	2,699	21,97
Brita nº 12,5	2,632	20,06
CAP	1,02	4,50
DMT		
2,435		

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

Valores de Gmb Corrigidos e Respectiveos Critérios, dados como % Gmm

Gmb corrigido, %Gmm	Critério	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3
%Gmm @ N inicial	<89	85,89	88,98	89,52
%Gmm @ N projeto	96	95,72	96	96
%Gmm @ N máximo	<98	96,56	97,94	97,12

Resumo das Informações da compactação das Misturas Tentativas

Mistura Tentativa 1	Ligante Tentativa %	%Gmm NInicial	%Gmm intermediário	%Gmm máximo	VAM%	Vv	P/a
1 Inf	5,2	86,66	96,77	97,33	15,28	3,23	0,81
2 inter	5,3	89,68	96,7	98,64	15,07	3,3	1,12
3 superior	4,5	89,95	96,42	97,55	14,36	3,58	1,13

Resumo das Informações das Misturas Tentativas Para Vv=

4

Mistura Tentativa 1	Ligante Tentativa %	Ligante Estimado	VAM%	RBV,%	%Gmm@Ninicial	%Gmm@Nmáximo
1 Inf	4	4,88	15,28	73,94	85,89	96,56
2 inter	4	5,02	15,14	73,57	88,98	97,94
3 superior	4	4,2	14,4	72,23	89,52	97,12

- Faixa Superior-Bio Asfalto-

Teor de Ligante do Grupo (%)		3,7									
Desidade Máxima Teórica - DMT		2,482									
DESCRIÇÃO	RELAÇÃO	RESULTADOS									
		8 Giros-	8 Giros - CP2	8 Giros - média	100 Giros - CP1	100 Giros -	100 Giros - média	160 Giros - CP1	160 Giros - CP2	160 Giros - média	
Massa Seca -MS (g)	-	1196,4	1196,9	1196,65	1197,8	1198,1	1197,95	1195,8	1196,8	1196,3	
Massa Submersa - Ms sub (g)	-	638,9	643,8	641,85	682	680,9	681,45	688,1	684,5	686,30	
Volume - V	MS (g) - Ms sub (g)	556,5	553,1	554,80	515,8	517,2	516,50	507,7	512,3	510,00	
Média das alturas		73,5	72,8	73,15	67,1	67,1	67,10	66,5	66,5	66,50	
Média dos diâmetros		99,9	99,9	99,90	99,9	100,1	100,00	99,7	100	99,85	
Vmx	$(\pi \cdot d^2 \cdot h_x) / 4 \cdot 0,001$	576,12	570,83	573,37	525,95	528,06	527,00	519,16	522,29	520,73	
Densidade (estimada) - Gmb	MS (g) / Vmx	2,08	2,10	2,09	2,28	2,27	2,27	2,30	2,29	2,30	
Coefficiente de correção	Gmb(medida)/Gmb(estimada) -	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	
Gmb (corrigida)	Cx Gmbn(estimada)	2,12	2,14	2,13	2,33	2,32	2,32	2,36	2,34	2,35	
Volume de Vazios -Vv	(100-%Gmm)	14,58	13,72	14,15	6,32	6,67	6,50	5,12	5,89	5,50	
Vazios do Agregado Mineral - VAM	$(100 - \{mm\} \cdot N_{projeto} \cdot X_{Gmm} \cdot X_{Pag}) / GSB$	22,01	21,23	21,62	14,47	14,79	14,63	13,37	14,07	13,72	
Relação das Betume/Vazios -RBV	VAMestimado-4/VAMest	79,89	79,25	79,57	71,91	72,46	72,18	69,82	71,19	70,51	
%Gmm		85,42	86,28	85,85	93,68	93,33	93,50	94,88	94,11	94,50	
Densidade medida	MM/Vs	2,15	2,16		2,32	2,32		2,36	2,34	2,35	
Percentagem de agregado		0,963	0,963	0,963	0,963	0,963	0,963	0,963	0,963	0,963	
Gsb		2,618	2,618		2,618	2,618		2,618	2,618	2,62	
PI(estimado)	$PII - [0,4 \cdot (4 - VV)]$	7,93	7,59	7,76	4,63	4,77	4,70	4,15	4,46	4,30	
Cc		0,20	0,20	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	
Vam estimado	VAMI+C*(4-Vv)	19,89	19,28	19,59	14,24	14,52	14,38	13,26	13,88	13,57	
%Gmmestimada@	$\%Gmm_{tent@} / Inicial - (4 - Vv)$	87,92	88,78	88,35	96,00	96,00	96,00	97,38	96,61	97,00	
Pie estimado	$(-Pag \cdot GI) / (Gse - Gsb) / (Gsex \cdot Gsb) + PI$	7,76	7,42	7,59	4,46	4,60	4,53	3,98	4,29	4,13	
Gse		2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	
P/A		0,60	0,63	0,62	1,05	1,02	1,04	1,18	1,09	1,14	

Dados		
Material	Densidade Real	% Mistura
Pó de	2,53	32,47
Areia	2,606	21,01
Brita nº 19	2,609	21,97
Brita nº 12,5	2,632	20,06
CAP	1,02	3,70
DMT		
2,482		

- Faixa Superior-Bio Asfalto-

Teor de Ligante do Grupo (%) 4,2

Desidade Máxima Teórica - DMT 2,452

DESCRIÇÃO	RELAÇÃO	RESULTADOS								
		8 Giros-	8 Giros - CP2	8 Giros - média	100 Giros - CP1	100 Giros -	100 Giros - média	160 Giros - CP1	160 Giros -CP2	160 Giros -média
Massa Seca -MS (g)	-	1195,6	1199	1197,3	1200	1198,9	1199,45	1196,9	1199,2	1198,05
Massa Submersa - Ms sub (g)	-	650,5	656,2	653,35	691,3	690,5	690,90	692	692,3	692,15
Volume - V	MS (g) - Ms sub (g)	545,1	542,8	543,95	508,7	508,4	508,55	504,9	506,9	505,90
Média das alturas		71,8	72	71,90	66,7	66,1	66,40	65,7	66	65,85
Média dos diâmetros		99,9	99,7	99,80	100,9	99,8	100,35	100	101,1	100,55
Vmx	$(\pi \cdot d^2 \cdot h \cdot x) / 4 \cdot 0,001$	562,79	562,10	562,45	533,33	517,07	525,20	516,01	529,83	522,92
Densidade (estimada) - Gmb	MS (g) / Vmx	2,12	2,13	2,13	2,25	2,32	2,28	2,32	2,26	2,29
Coefficiente de correção	Gmb(medida)/Gmb(estimada) -	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,02	1,05	1,03
Gmb (corrigida)	Cx Gmbn(estimada)	2,20	2,20	2,20	2,33	2,40	2,36	2,37	2,37	2,37
Volume de Vazios -Vv	(100-%Gmm)	10,48	10,11	10,29	5,18	2,29	3,74	3,34	3,54	3,44
Vazios do Agregado Mineral - VAM	$(100 - \text{mm} \cdot \text{Nprojeto} \cdot \text{Gmm} \cdot \text{XPag}) / \text{Gsb}$	19,66	19,59	19,63	15,18	12,59	13,89	13,53	13,71	13,62
Relação das Betume/Vazios -RBV	VAMestimado-4/VAMest	78,22	78,22	78,22	73,44	68,66	71,05	70,58	70,91	70,75
%Gmm		89,52	89,89	89,71	94,82	97,71	96,26	96,66	96,46	96,56
Densidade medida	MM/Vs	2,19	2,21		2,36	2,36		2,37	2,37	2,37
Percentagem de agregado		0,958	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,96
Gsb		2,618	2,618		2,618	2,618		2,618	2,618	2,62
PI(estimado)	$PI = [0,4 \cdot (4 - Vv)]$	6,79	6,64	6,72	4,67	3,52	4,10	3,94	4,01	3,97
Cc		0,20	0,20	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Vam estimado	VAM+C*(4-Vv)	18,37	18,37	18,37	15,06	12,76	13,91	13,60	13,75	13,67
%Gmmestimada@	%Gmm, tent@inicial-(4-Vv)	89,26	89,63	89,44	96,00	96,00	96,00	96,40	96,20	96,30
PIe estimado	$(-Pag \cdot GI) / (Gse - Gsb) / (Gsex \cdot Gsb) + PI$	6,62	6,48	6,55	4,51	3,35	3,93	3,77	3,85	3,81
Gse		2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63
P/A		0,71	0,72	0,72	1,04	1,40	1,22	1,24	1,22	1,23

Dados		
Material	Densidade Real	% Mistura
Pó de	2,53	32,47
Areia	2,606	21,01
Brita nº 19	2,699	21,97
Brita nº 12,5	2,632	20,06
CAP	1,02	4,20
DMT		
2,452		

- Faixa Superior-Bio Asfalto-

Teor de Ligante do Grupo (%)		4,7									
Desidade Máxima Teórica - DMT		2,428									
DESCRIÇÃO	RELAÇÃO	RESULTADOS									
		8 Giros-	8 Giros - CP2	8 Giros - média	100 Giros - CP1	100 Giros -	100 Giros - média	160 Giros - CP1	160 Giros - CP2	160 Giros - média	
Massa Seca -MS (g)	-	1199,7	1122,6	1161,15	1201,3	1199,3	1200,3	1200,02	1199,9	1199,96	
Massa Submersa - Ms sub (g)	-	656,7	616,8	636,75	693,1	692,3	692,70	691,5	691,2	691,35	
Volume - V	MS (g) - Ms sub (g)	543	505,8	524,40	508,2	507	507,60	508,52	508,7	508,61	
Média das alturas		72,4	68,2	70,30	67,1	67,4	67,25	66,7	66,3	66,50	
Média dos diâmetros		100	99,8	99,90	99,9	100	99,95	100,2	100,1	100,15	
Vmx	$(\pi \cdot d^2 \cdot h \cdot x) / 4 \cdot 0,001$	568,63	533,50	551,07	525,95	529,36	527,65	525,96	521,76	523,86	
Densidade (estimada) - Gmb	MS (g) / Vmx	2,11	2,10	2,11	2,28	2,27	2,27	2,28	2,30	2,29	
Coefficiente de correção	Gmb(medida)/Gmb(estimada) -	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Gmb (corrigida)	Cx Gmbn(estimada)	2,17	2,17	2,17	2,35	2,33	2,34	2,36	2,36	2,36	
Volume de Vazios -Vv	(100-%Gmm)	10,50	10,74	10,62	3,11	3,90	3,50	2,81	2,85	2,83	
Vazios do Agregado Mineral - VAM	$(100 - \{mm\} @ Nprojeto \cdot Gmm \cdot XPag) / GSB$	20,90	21,11	21,01	14,37	15,06	14,72	14,10	14,14	14,12	
Relação das Betume/Vazios -RBV	VAMestimado-4/VAMest	79,59	79,76	79,68	72,33	73,46	72,90	71,87	71,94	71,91	
%Gmm		89,50	89,26	89,38	96,89	96,10	96,50	97,19	97,15	97,17	
Densidade medida	MM/Vs	2,21	2,22		2,36	2,37		2,36	2,36	2,36	
Porcentagem de agregado		0,953	0,953	0,953	0,953	0,953	0,953	0,953	0,953	0,953	
Gsb		2,618	2,618		2,618	2,618		2,618	2,618	2,62	
PI(estimado)	$PII - [0,4 \cdot (4 - Vv)]$	7,30	7,40	7,35	4,34	4,66	4,50	4,22	4,24	4,23	
Cc		0,20	0,20	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	
Vam estimado	VAMH+C*(4-Vv)	19,60	19,76	19,68	14,46	15,07	14,77	14,22	14,26	14,24	
%Gmmestimada@	%Gmm,tent@inicial-(4-Vv)	89,00	88,76	88,88	96,00	96,00	96,00	96,69	96,65	96,67	
Ple estimado	$(-Pag \cdot GI) / (Gse - Gsb) / (Gsex \cdot Gsb) + PI$	7,13	7,23	7,18	4,18	4,49	4,33	4,06	4,07	4,07	
Gse		2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	
P/A		0,66	0,65	0,65	1,12	1,04	1,08	1,16	1,15	1,15	

Dados		
Material	Densidade Real	% Mistura
Pó de	2,53	32,40
Areia	2,606	20,97
Brita nº 19	2,699	21,92
Brita nº 12,5	2,632	20,01
CAP	1,02	4,70
DMT		
2,428		

- Faixa Superior-Bio Asfalto-

Teor de Ligante do Grupo (%)		5,2									
Desidade Máxima Teórica - DMT		2,411									
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)	-	1199,7	1198,9	1199,3	1198,1	1201,2	1199,65	1201,7	1180	1190,85	
Massa Submersa - Ms sub (g)	-	663,2	659,2	661,20	691,1	694,9	693,00	698	685,4	691,70	
Volume - V	MS (g) - Ms sub (g)	536,5	539,7	538,10	507	506,3	506,65	503,7	494,6	499,15	
Média das alturas		71,7	72,2	71,95	66,2	65,8	66,00	65,8	64,8	65,20	
Média dos diâmetros		99,9	100	99,95	100,1	100	100,05	100	99,9	99,95	
Vmx	$(\pi \cdot d^2 \cdot h \cdot x) / 4 \cdot 0,001$	562,01	567,06	564,53	520,98	516,79	518,88	516,79	506,35	511,57	
Densidade (estimada) - Gmb	MS (g) / Vmx	2,13	2,11	2,12	2,30	2,32	2,31	2,33	2,33	2,33	
Coefficiente de correcao	Gmb(medida)/Gmb(estimada) -	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,03	1,02	1,02	
Gmb (corrigida)	Cx Gmbn(estimada)	2,19	2,17	2,18	2,36	2,38	2,37	2,39	2,39	2,39	
Volume de Vazios -Vv	(100-%Gmm)	9,24	10,11	9,68	2,23	1,18	1,70	1,03	1,03	1,03	
Vazios do Agregado Mineral - VAM	$(100 - (mm @ Nprojeto \cdot Gmm \cdot XPag)) / GSB$	20,78	21,54	21,16	14,66	13,74	14,20	13,61	13,61	13,61	
Relação das Betume/Vazios -RBV	VAMestimado-4/VAMest	79,73	80,31	80,02	73,04	71,48	72,26	71,25	71,25	71,25	
%Gmm		90,76	89,89	90,32	97,77	98,82	98,30	98,97	98,97	98,97	
Densidade medida	MM/Vs	2,24	2,22		2,36	2,37		2,39	2,39	2,39	
Percentagem de agregado		0,948	0,948	0,948	0,948	0,948	0,948	0,948	0,948	0,948	
Gsb		2,618	2,618		2,618	2,618		2,618	2,618	2,62	
PI(estimado)	$PII - [0,4 \cdot (4 - Vv)]$	7,30	7,64	7,47	4,49	4,07	4,28	4,01	4,01	4,01	
Cc		0,20	0,20	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	
Vam estimado	VAM+C*(4-Vv)	19,73	20,32	20,03	14,84	14,03	14,43	13,91	13,91	13,91	
%Gmmestimada@	$\%Gmm_{tent@inicial} - (4 - Vv)$	88,46	87,59	88,03	96,00	96,00	96,00	96,67	96,67	96,67	
Pie estimado	$-(Pag \cdot G) / (Gse - Gsb) / (GsexGsb) + PI$	7,13	7,48	7,30	4,32	3,91	4,11	3,85	3,85	3,85	
Gse		2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	
P/A		0,66	0,63	0,64	1,08	1,20	1,14	1,22	1,22	1,22	

Dados		
Material	Densidade Real	% Mistura
Pó de	2,53	32,23
Areia	2,606	20,86
Brita nº 19	2,699	21,80
Brita nº 12,5	2,632	19,91
CAP	1,02	5,20
DMT		
2,411		

- Faixa Superior-Bio Asfalto-

Teor de Ligante do Grupo (%) 4,4

Desidade Máxima Teórica - DMT 2,432

DESCRIÇÃO	RELAÇÃO	RESULTADOS								
		8 Giros -	8 Giros - CP2	8 Giros - média	100 Giros - CP1	100 Giros -	100 Giros - média	160 Giros - CP1	160 Giros -CP2	160 Giros -média
Massa Seca -MS (g)	-	1200,6	1201,7	1201,15	1199,5	1202,7	1201,1	1200,4	1199,8	1200,1
Massa Submersa - Ms sub (g)	-	655,7	653,1	654,40	691	691,8	691,40	694,6	694,5	694,55
Volume - V	MS (g) - Ms sub (g)	544,9	548,6	546,75	508,5	510,9	509,70	505,8	505,3	505,55
Média das alturas		71,4	71,9	71,65	66,3	66,3	66,30	65,8	65,3	65,55
Média dos diâmetros		100	99,9	99,95	100	100,4	100,20	100	99,8	99,90
Vmx	$(\pi \cdot d^2 \cdot h \cdot x) / 4 \cdot 0,001$	560,78	563,57	562,17	520,72	524,89	522,81	516,79	510,82	513,80
Densidade (estimada) - Gmb	MS (g) / Vmx	2,14	2,13	2,14	2,30	2,29	2,30	2,32	2,35	2,34
Coefficiente de correção	Gmb(medida)/Gmb(estimada) -	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,01	1,02
Gmb (corrigida)	Cx Gmb(estimada)	2,18	2,17	2,17	2,34	2,33	2,33	2,37	2,37	2,37
Volume de Vazios -Vv	(100-%Gmm)	10,53	10,90	10,71	3,74	4,25	3,99	2,41	2,37	2,39
Vazios do Agregado Mineral - VAM	$(100 - (mm @ Nprojeto \cdot Gmm \cdot X \cdot Pag)) / GSB$	20,55	20,87	20,71	14,52	14,97	14,74	13,34	13,30	13,32
Relação das Betume/Vazios -RBV	VAMestimado-4/VAMest	79,21	79,48	79,35	72,50	73,24	72,87	70,37	70,29	70,33
%Gmm		89,47	89,10	89,29	96,26	95,75	96,01	97,59	97,63	97,61
Densidade medida	MM/Vs	2,20	2,19		2,36	2,35		2,37	2,37	2,37
Porcentagem de agregado		0,956	0,956	0,956	0,956	0,956	0,956	0,956	0,956	0,956
Gsb		2,618	2,618		2,618	2,618		2,618	2,618	2,62
PI(estimado)	$PII - [0,4 \cdot (4 - Vv)]$	7,01	7,16	7,09	4,30	4,50	4,40	3,77	3,75	3,76
Cc		0,20	0,20	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Vam estimado	$VAM + C \cdot (4 - Vv)$	19,24	19,49	19,37	14,54	14,95	14,74	13,50	13,46	13,48
%Gmmestimada@	$\%Gmm_{tent@inicial} - (4 - Vv)$	87,86	89,10	88,48	96,00	96,00	96,00	97,58	97,63	97,60
Ple estimado	$(-Pag \cdot GI) \cdot (Gse - Gsb) / (Gsex \cdot Gsb) + PI$	6,84	6,99	6,92	4,13	4,33	4,23	3,60	3,58	3,59
Gse		2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63
PIA		0,69	0,67	0,68	1,14	1,08	1,11	1,30	1,31	1,31

Dados		
Material	Densidade Real	% Mistura
Pó de	2,53	34,00
Areia	2,606	22,00
Brita nº 19	2,699	23,00
Brita nº 12,5	2,632	21,00
CAP	1,02	4,40
DMT		
2,432		

SERVOPAC Version 1.26

Run number: 1951

Date: 17/03/11

Industrial Process Controls (Australia) Limited

Time: 16:39

Batch: 3&VI

Weight: 1200(g)

Diameter: 100mm

MaxDensity: 2432(kg/m3)

Vertical stress: 600kPa

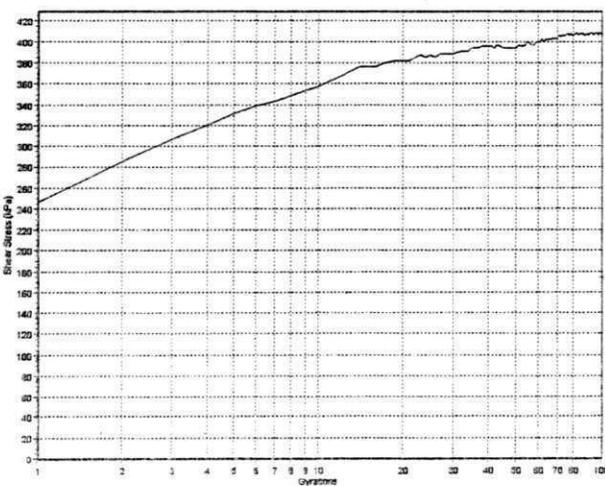
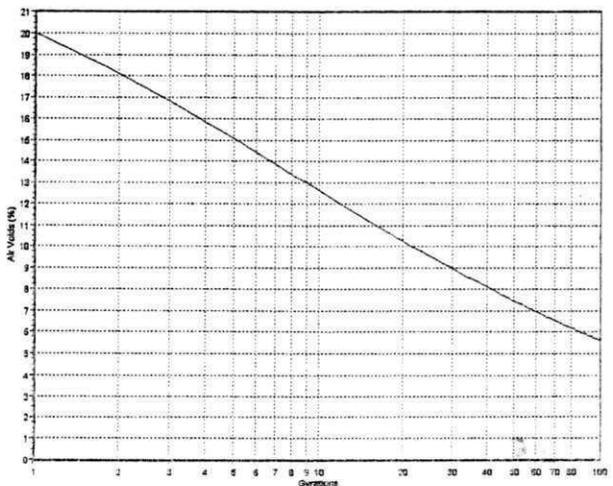
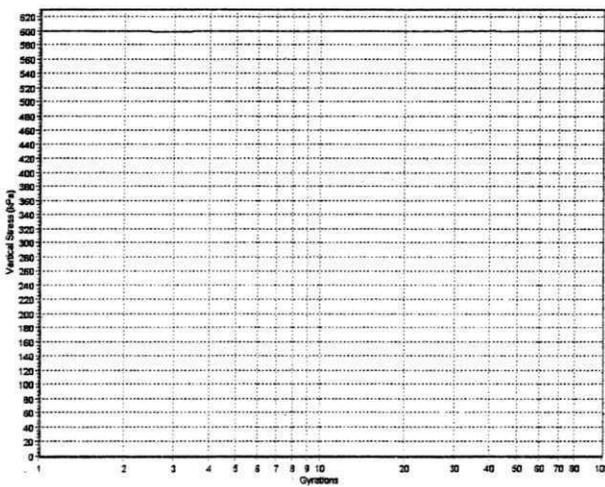
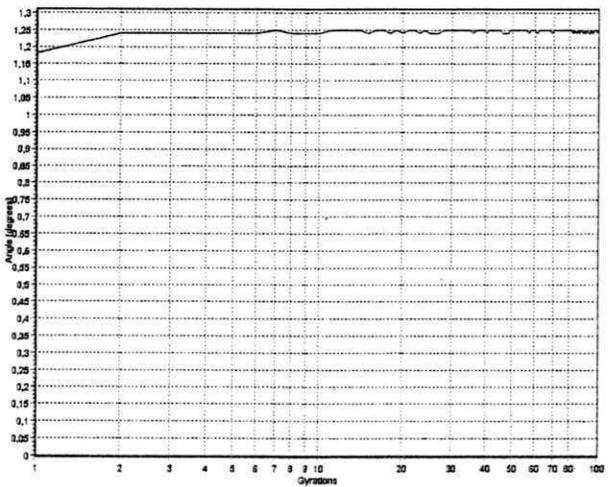
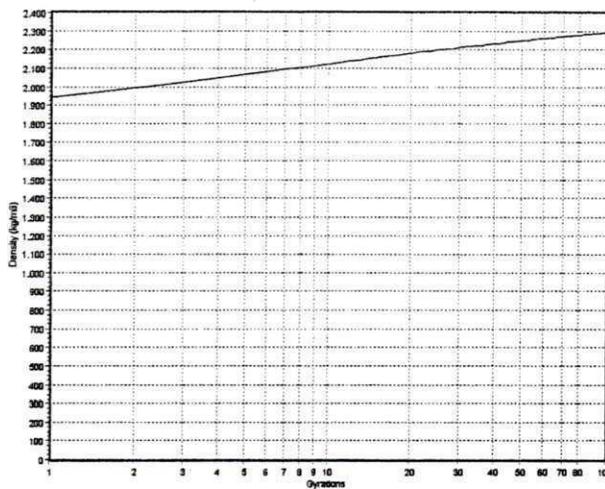
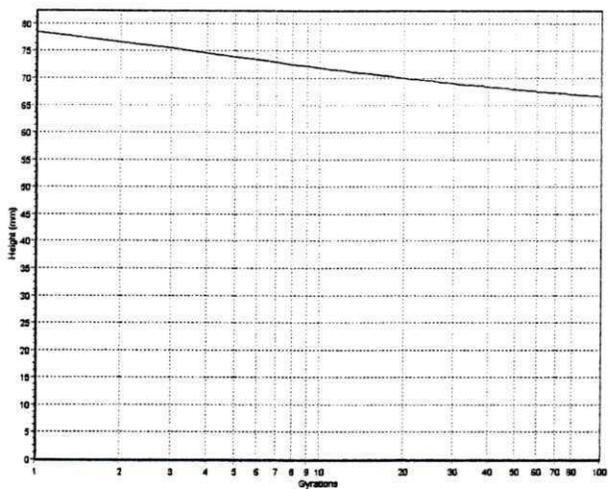
Rate: 30 (gyrn/min)

Comment:

Control mode: 1000 kPa (shear stress)

Termination: 100 gyrations

At termination: Gyration=100 Density=2295,16kg/m3 Height=66,57mm



UFCG/BIBLIOTECA/BC

SERVOPAC Version 1.26

Run number: 1950

Date: 17/03/11

Batch: 3%V

Weight: 1200(g)

Vertical stress: 600kPa

Rate: 30 (gyrn/min)

Control mode: 1000 kPa (shear stress)

Termination: 100 gyrations

At termination: Gyration=100

Density=2278,39kg/m3

Height=67,06mm

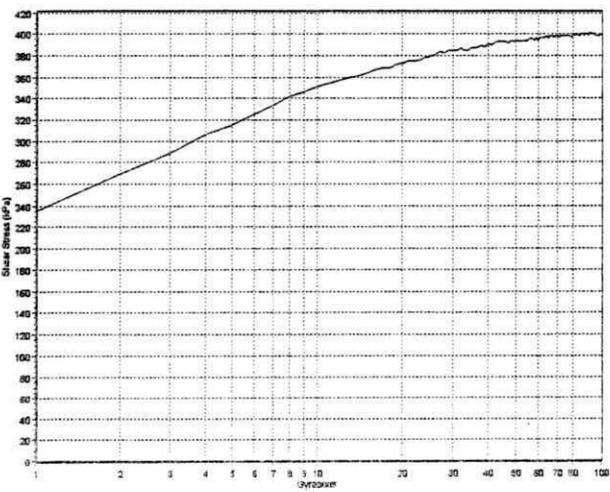
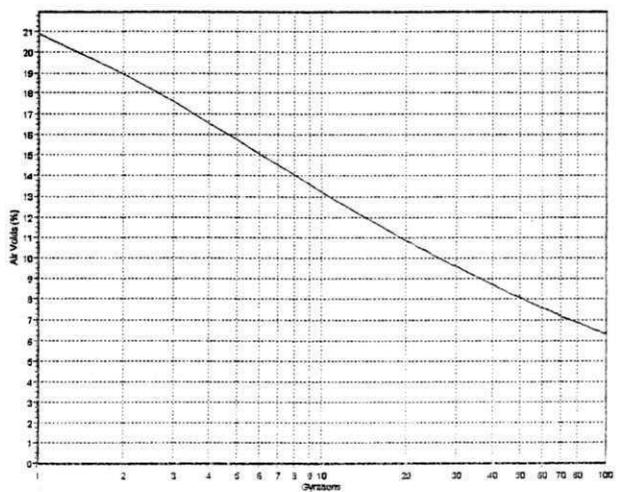
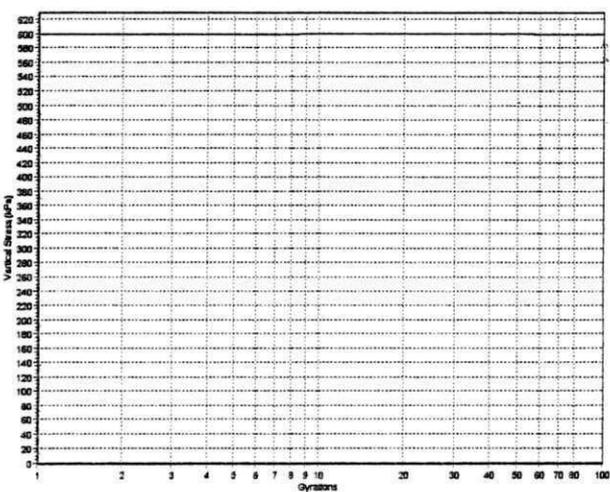
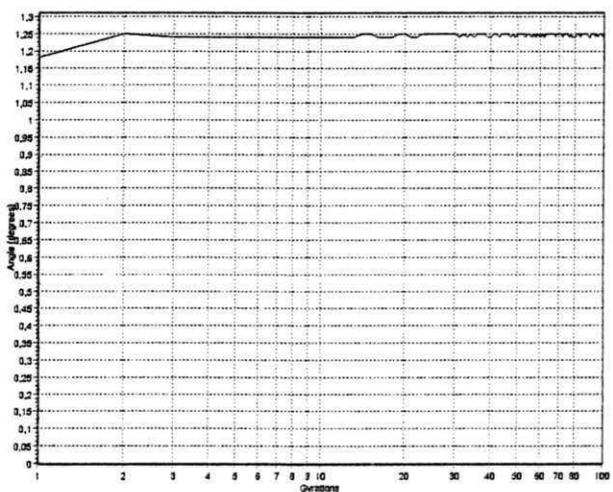
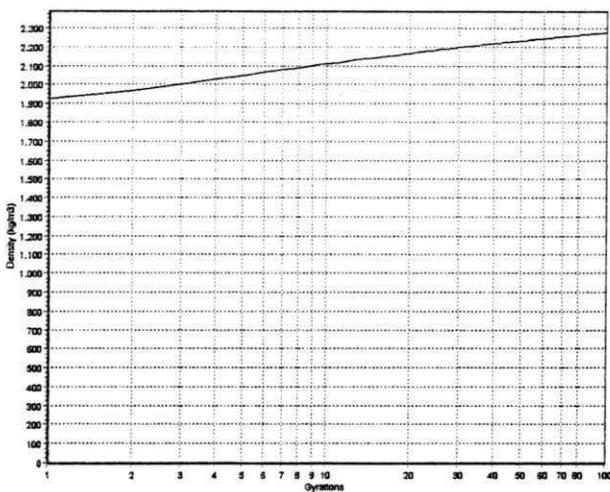
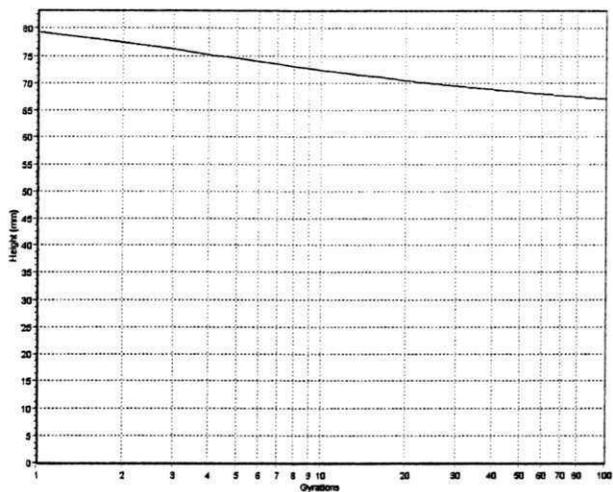
Industrial Process Controls (Australia) Limited

Time: 16:34

Diameter: 100mm

MaxDensity: 2432(kg/m3)

Comment:



SERVOPAC Version 1.26

Run number: 1949

Date: 17/03/11

Industrial Process Controls (Australia) Limited

Time: 16:29

Batch: 3%IV

Weight: 1200(g)

Diameter: 100mm

MaxDensity: 2432 (kg/m3)

Vertical stress: 600kPa

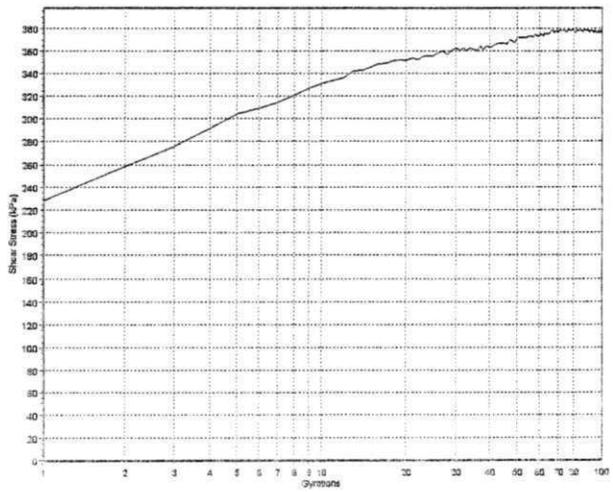
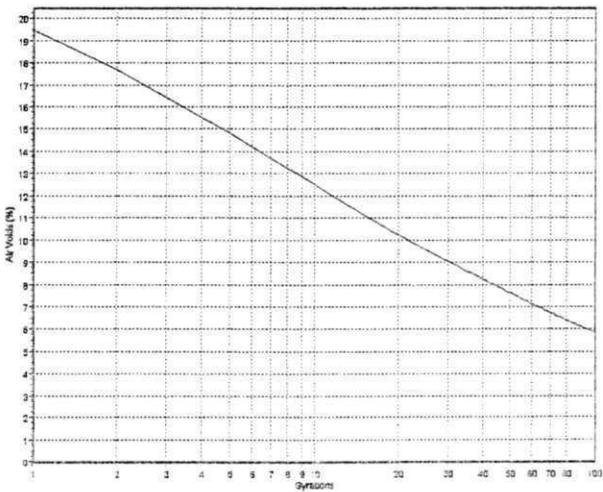
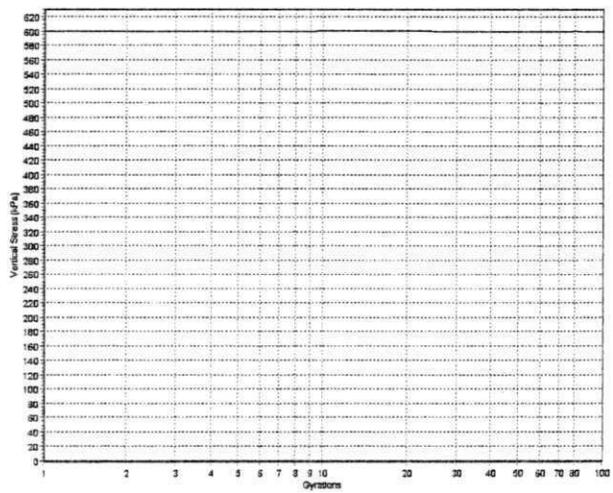
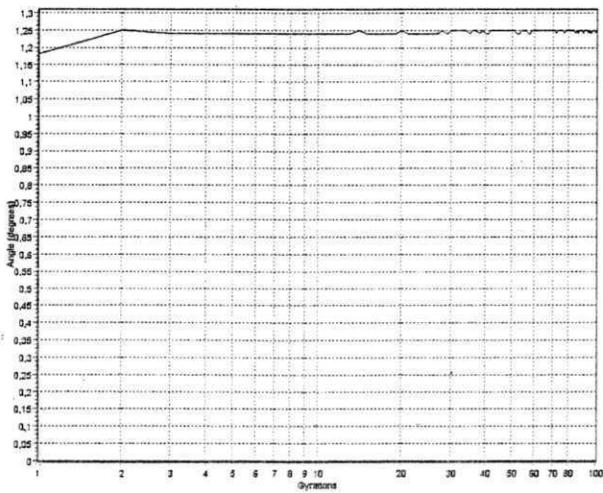
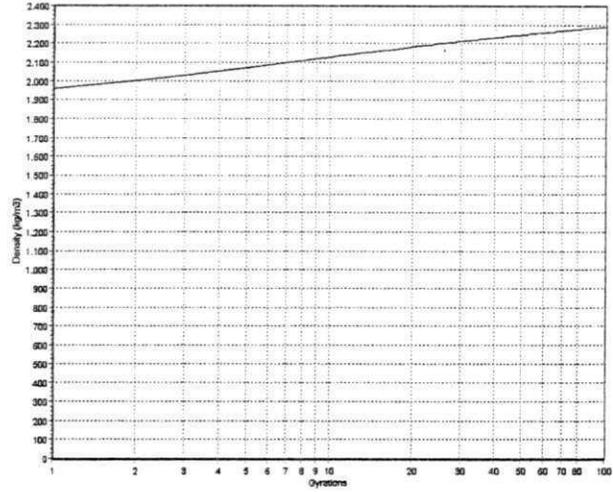
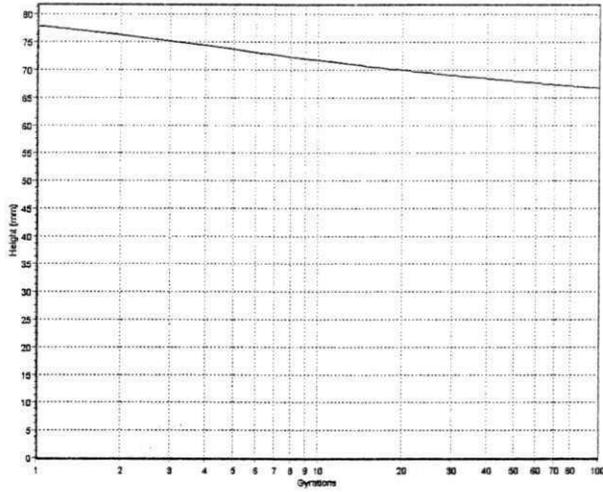
Rate: 30 (gyrn/min)

Comment:

Control mode: 1000 kPa (shear stress)

Termination: 100 gyrations

At termination: Gyration=100 Density=2290,00kg/m3 Height=66,72mm



SERVOPAC Version 1.26

Run number: 1948

Date: 17/03/11

Batch: 3%III

Weight: 1200(g)

Vertical stress: 600kPa

Rate: 30 (gyrn/min)

Control mode: 1000 kPa (shear stress)

Termination: 100 gyrations

At termination: Gyration=100

Density=2286,91kg/m3

Height=66,81mm

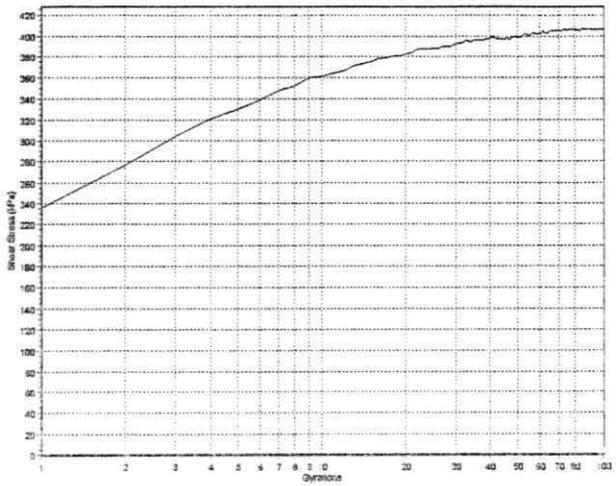
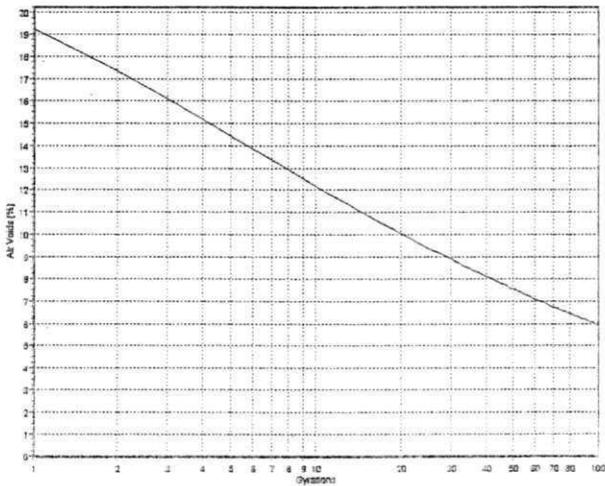
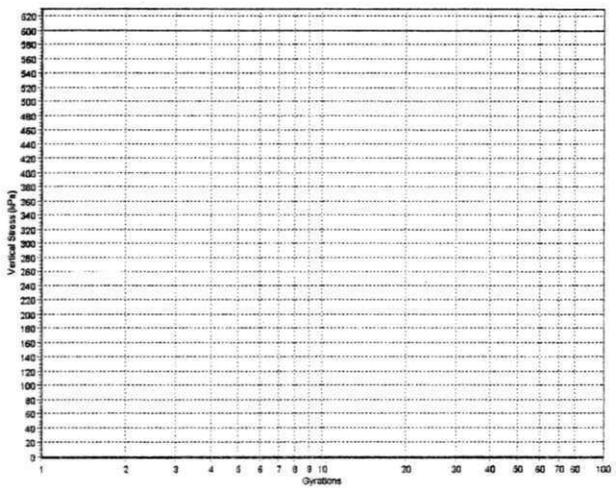
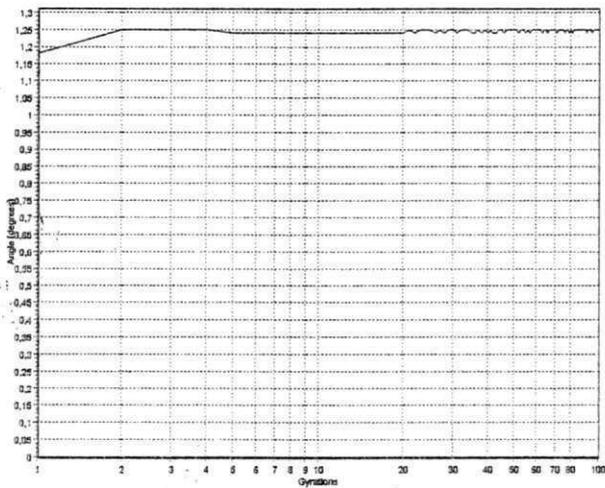
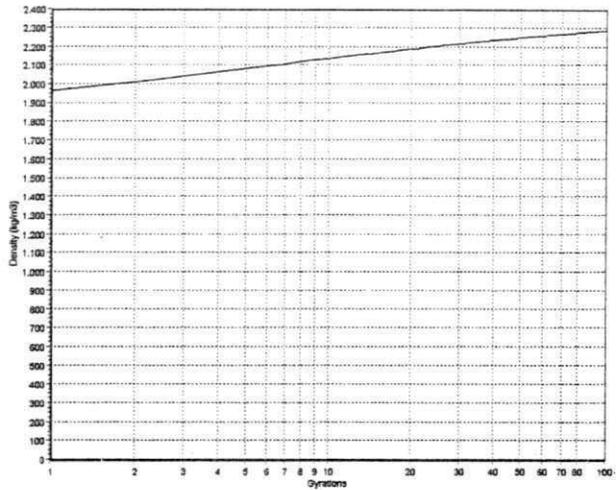
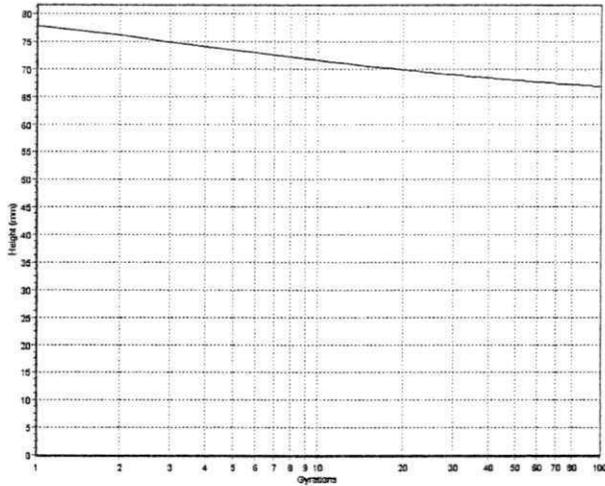
Industrial Process Controls (Australia) Limited

Time: 16:23

Diameter: 100mm

MaxDensity: 2432(kg/m3)

Comment:



SERVOPAC Version 1.26

Run number: 1947 Date: 17/03/11

Batch: 3% II Weight: 1200(g)

Vertical stress: 600kPa Rate: 30 (gyrn/min)

Control mode: 1000 kPa (shear stress)

Termination: 100 gyrations

At termination: Gyration=100 Density=2300,69kg/m3 Height=66,41mm

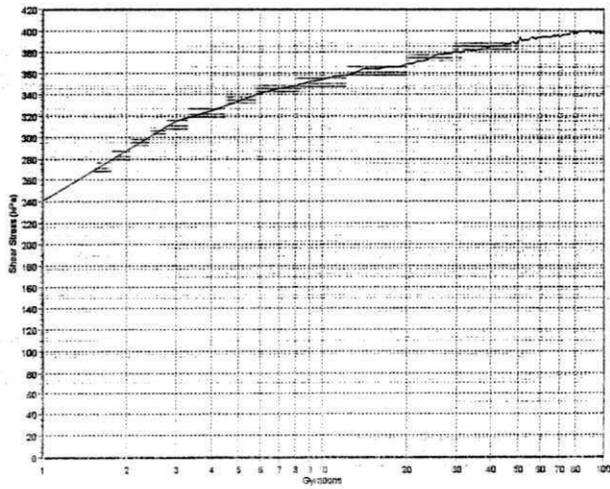
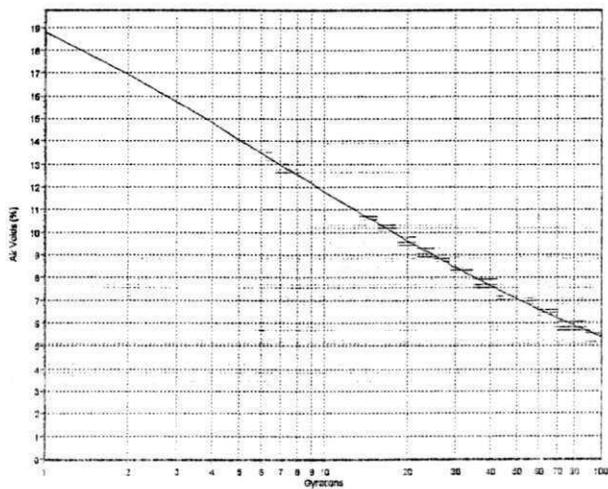
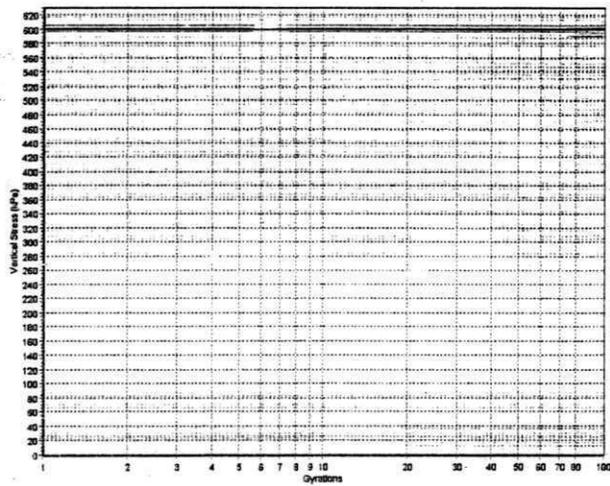
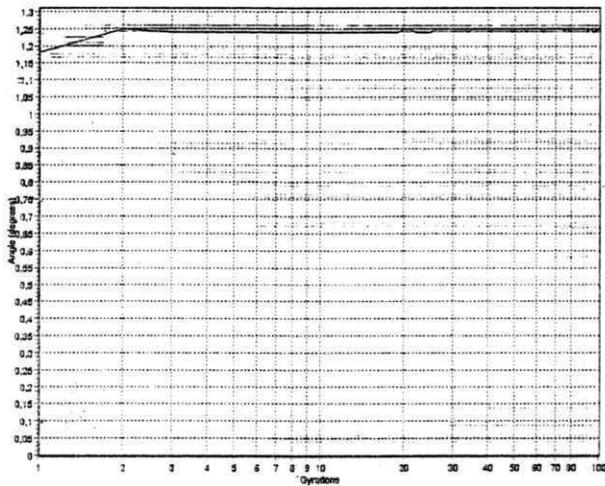
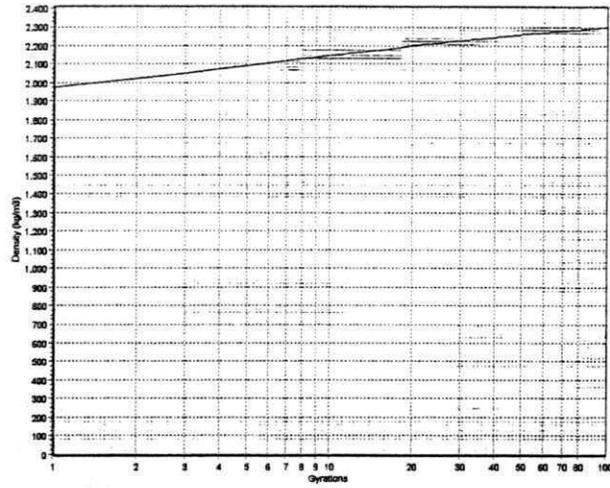
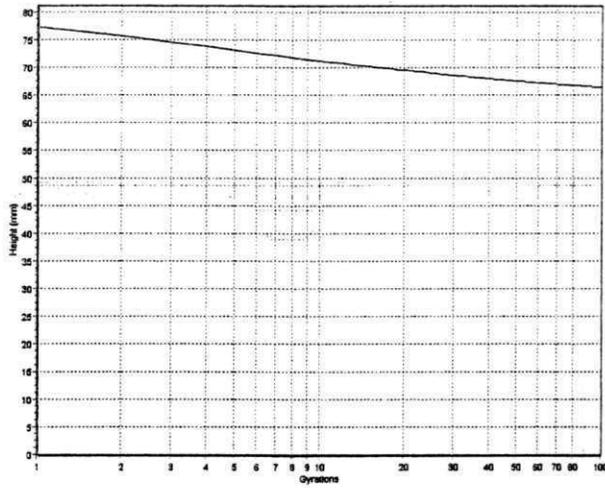
Industrial Process Controls (Australia) Limited

Time: 16:17

Diameter: 100mm

MaxDensity: 2432(kg/m3)

Comment:



SERVOPAC Version 1.26

Run number: 1946

Date: 17/03/11

Batch: 3 & I

Weight: 1200(g)

Vertical stress: 600kPa

Rate: 30 (gyrn/min)

Control mode: 1000 kPa (shear stress)

Termination: 100 gyrations

At termination: Gyration=100

Density=2295,50kg/m3

Height=66,56mm

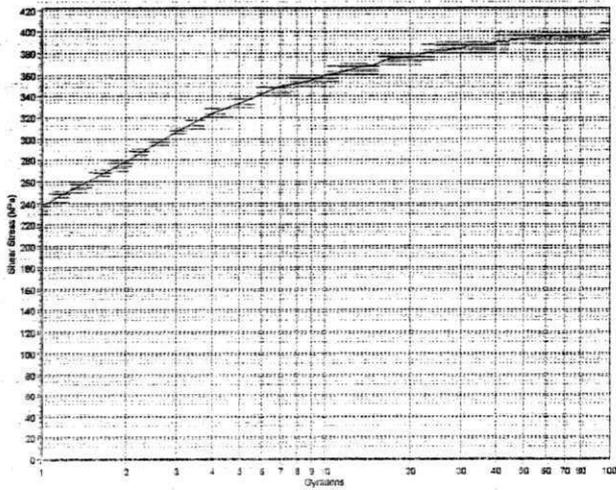
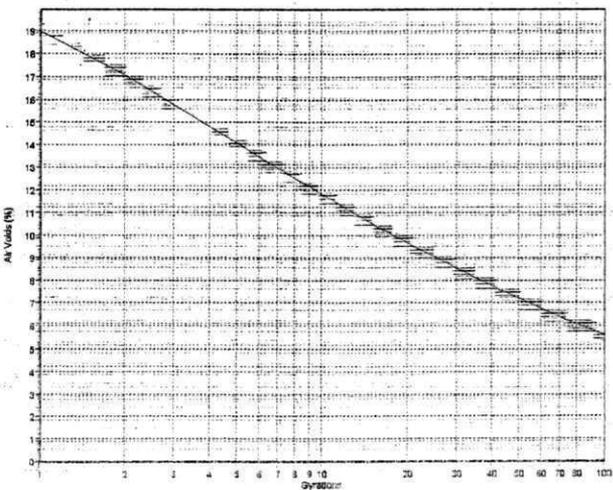
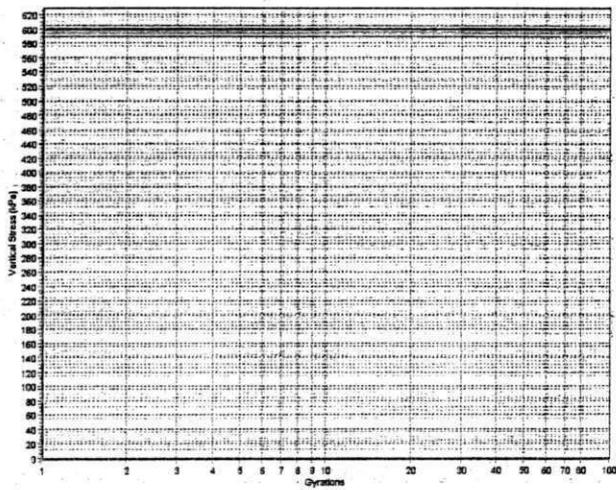
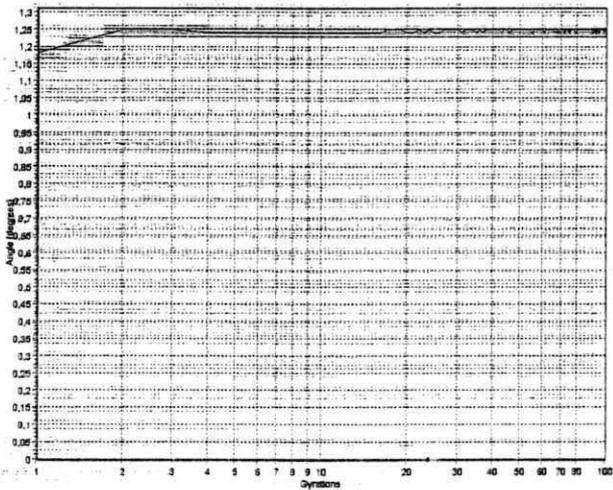
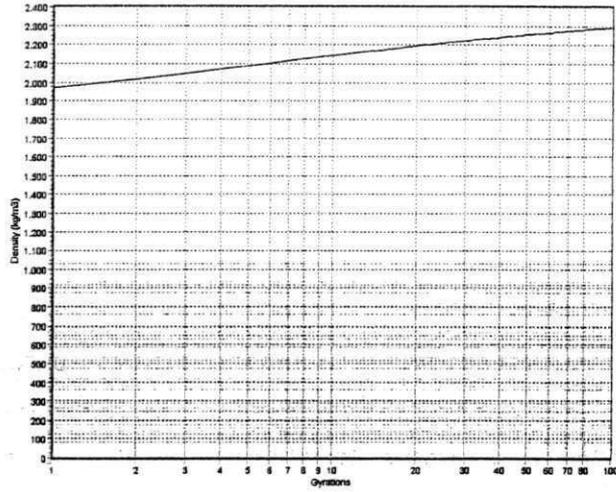
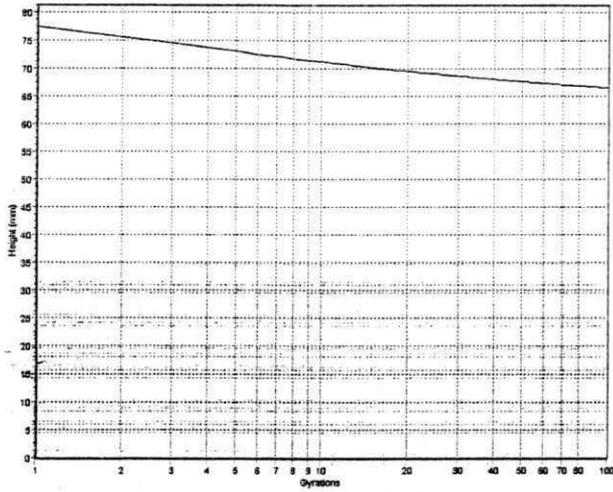
Industrial Process Controls (Australia) Limited

Time: 16:12

Diameter: 100mm

MaxDensity: 2432(kg/m3)

Comment:



SERVOPAC Version 1.26

Run number: 1944

Date: 17/03/11

Batch: 9% MA

Weight: 1200(g)

Vertical stress: 600kPa

Rate: 30 (gyrn/min)

Control mode: 1000 kPa (shear stress)

Termination: 100 gyrations

At termination: Gyration=100

Density=2285,89kg/m3

Height=66,84mm

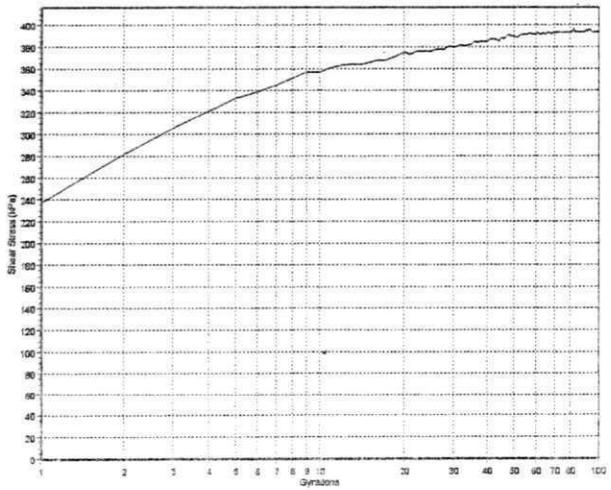
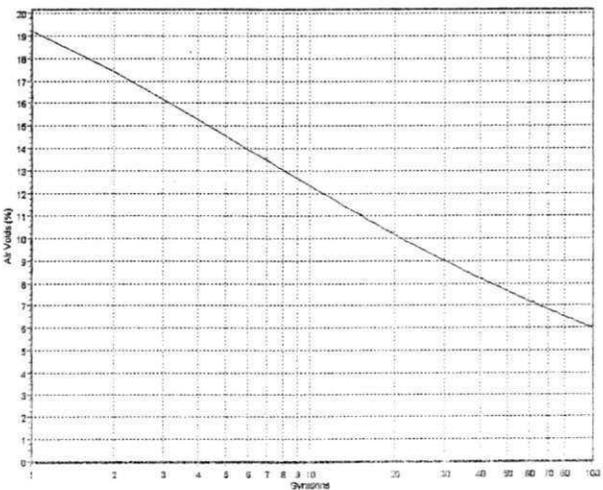
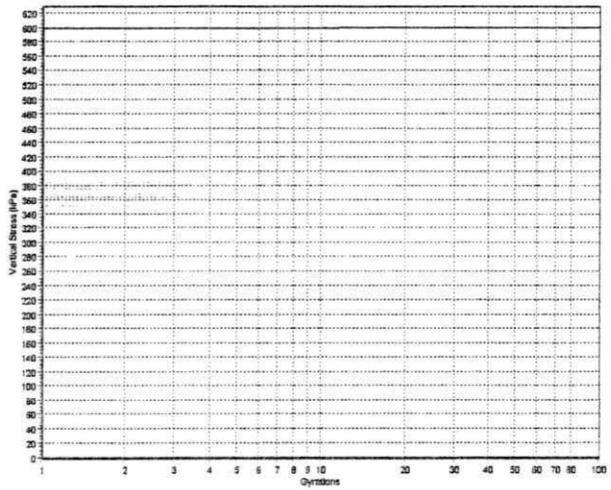
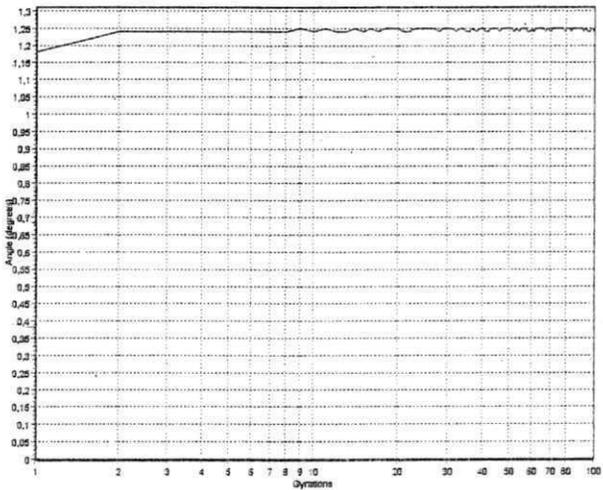
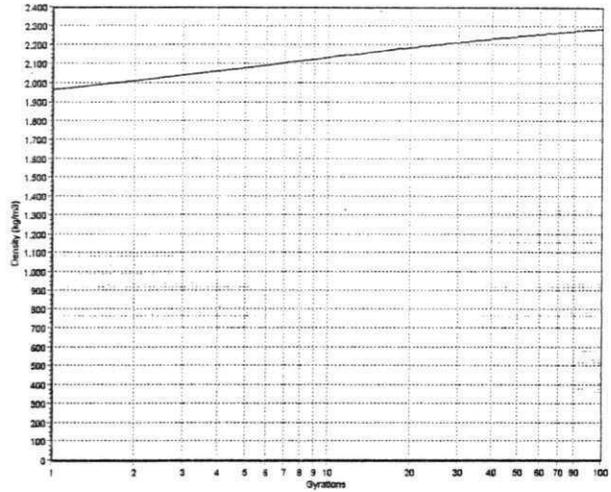
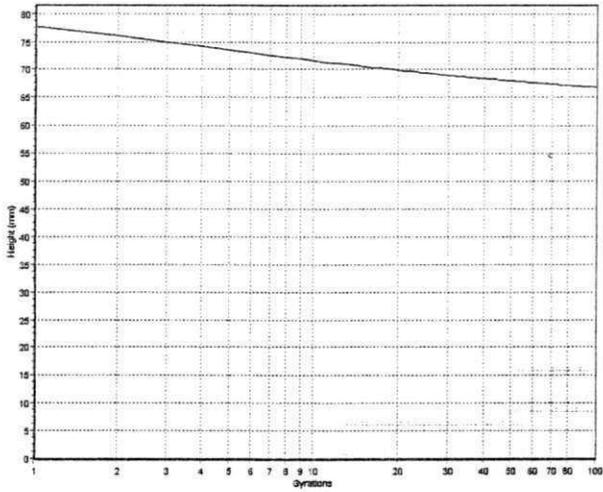
Industrial Process Controls (Australia) Limited

Time: 12:07

Diameter: 100mm

MaxDensity: 2432(kg/m3)

Comment:



SERVOPAC Version 1.26

Run number: 1943 Date: 17/03/11

Batch: 9% MA Weight: 1200(g)

Vertical stress: 600kPa Rate: 30 (gyrn/min)

Control mode: 1000 kPa (shear stress)

Termination: 100 gyrations

At termination: Gyration=100 Density=2283,50kg/m3 Height=66,91mm

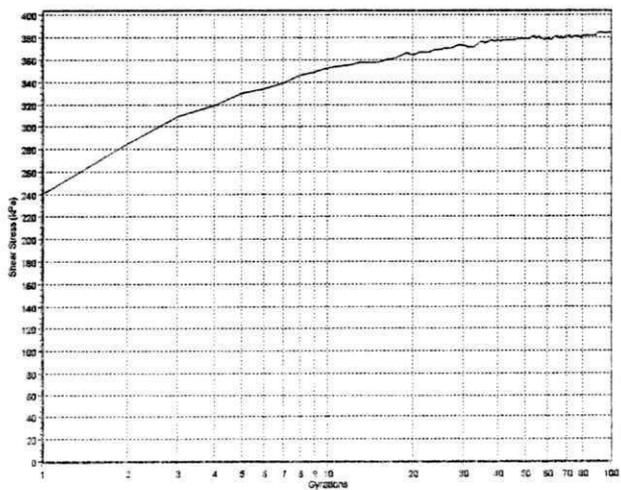
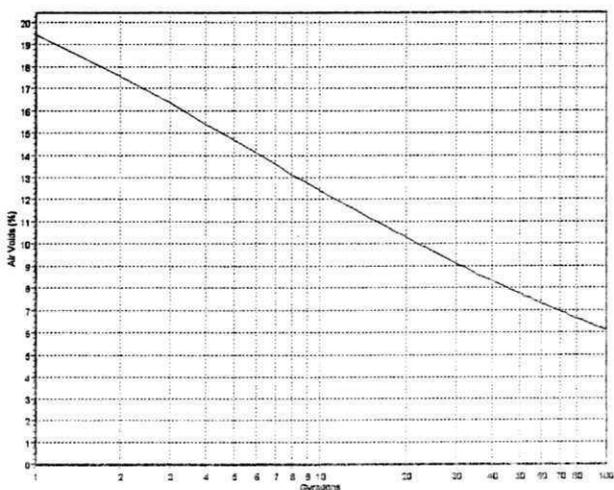
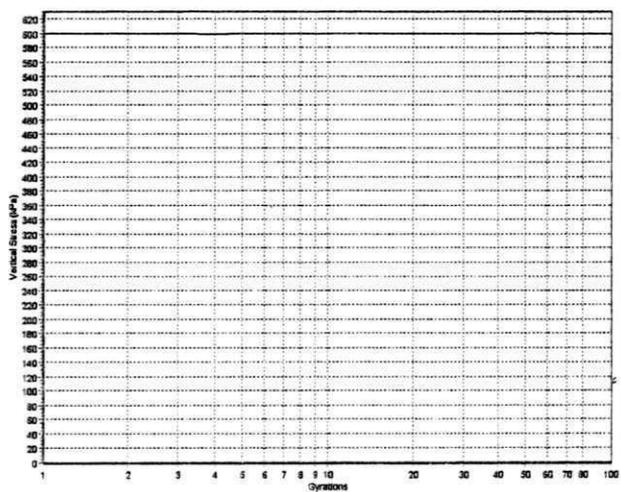
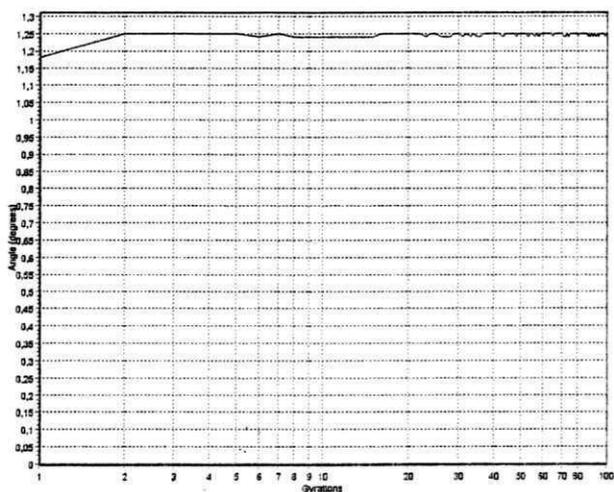
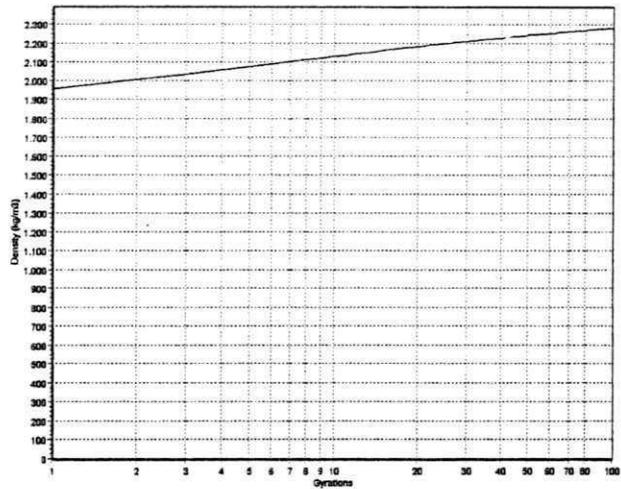
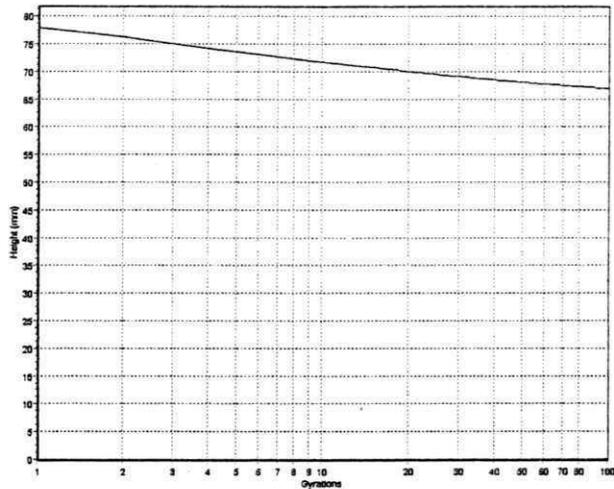
Industrial Process Controls (Australia) Limited

Time: 11:58

Diameter: 100mm

MaxDensity: 2432(kg/m3)

Comment:



SERVOPAC Version 1.26

Run number: 1942

Date: 17/03/11

Batch: 9% MA

Weight: 1200(g)

Vertical stress: 600kPa

Rate: 30 (gyrn/min)

Control mode: 1000 kPa (shear stress)

Termination: 100 gyrations

At termination: Gyration=100 Density=2295,16kg/m3 Height=66,57mm

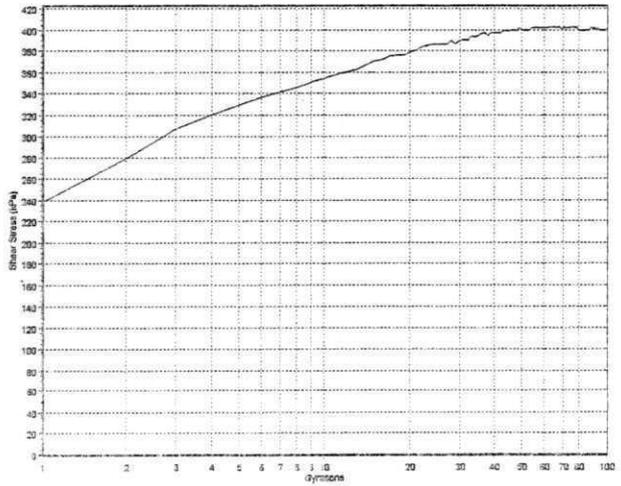
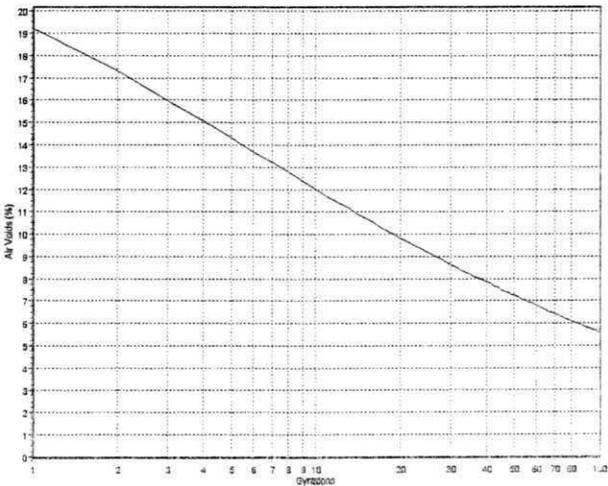
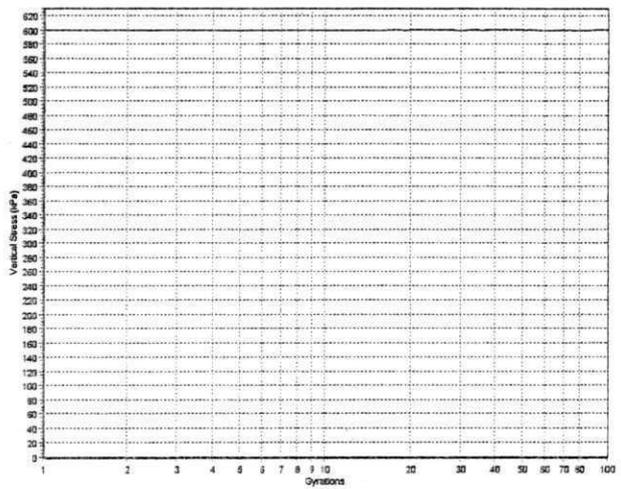
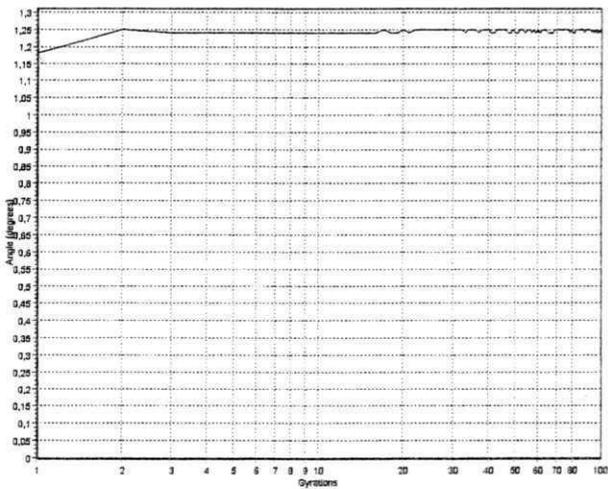
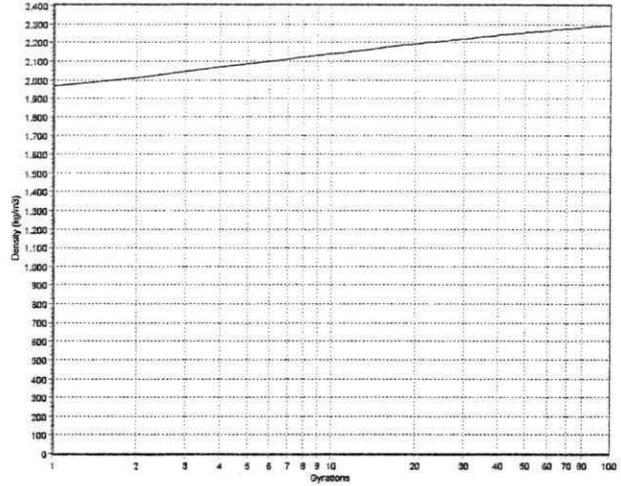
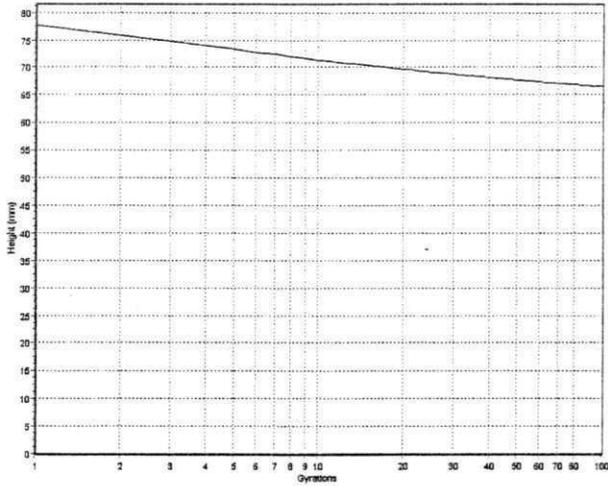
Industrial Process Controls (Australia) Limited

Time: 11:53

Diameter: 100mm

MaxDensity: 2432(kg/m3)

Comment:



SERVOPAC Version 1.26

Run number: 1941 Date: 17/03/11

Batch: 9% MA Weight: 1200(g)

Vertical stress: 600kPa Rate: 30 (gyrn/min)

Control mode: 1000 kPa (shear stress)

Termination: 100 gyrations

At termination: Gyration=100 Density=2261,19kg/m3 Height=67,57mm

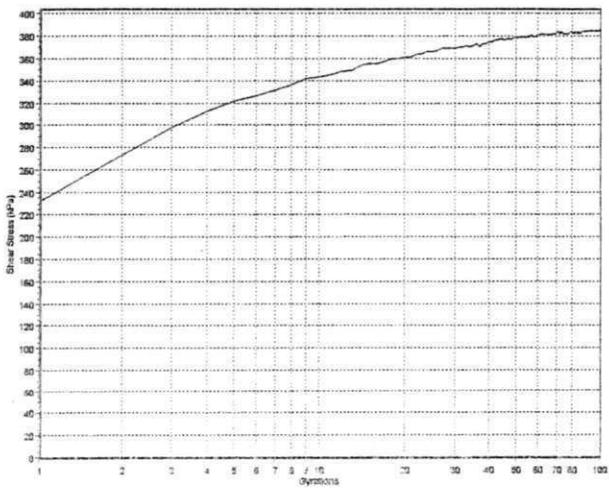
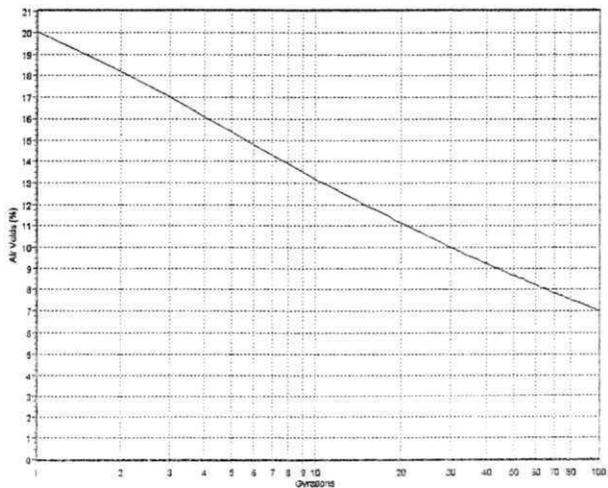
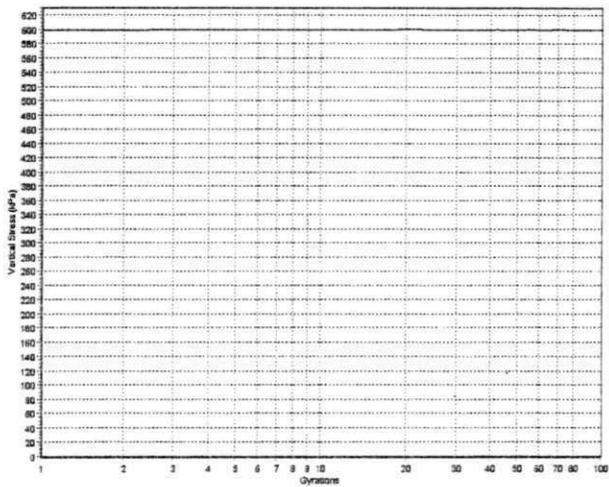
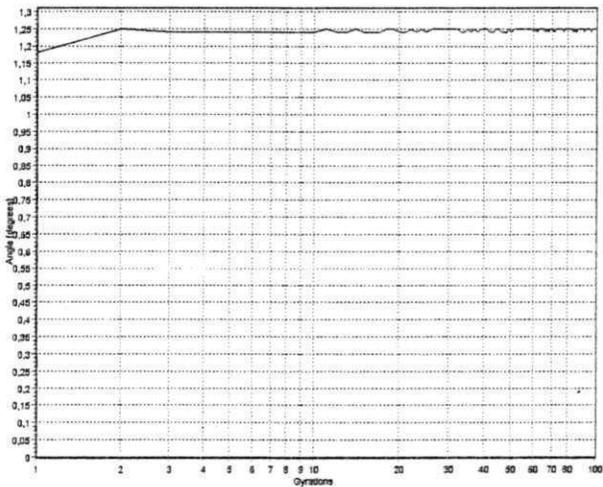
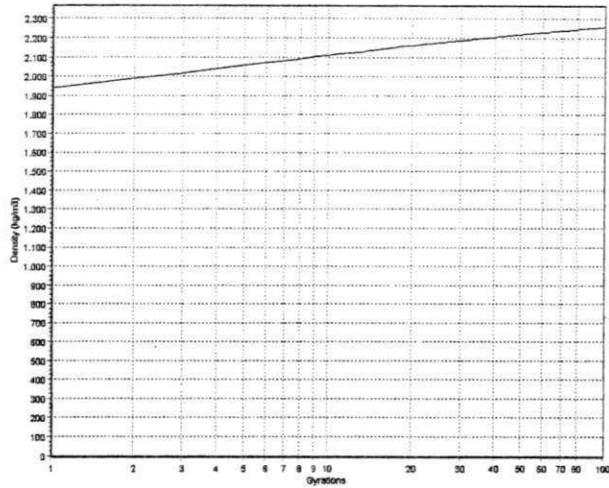
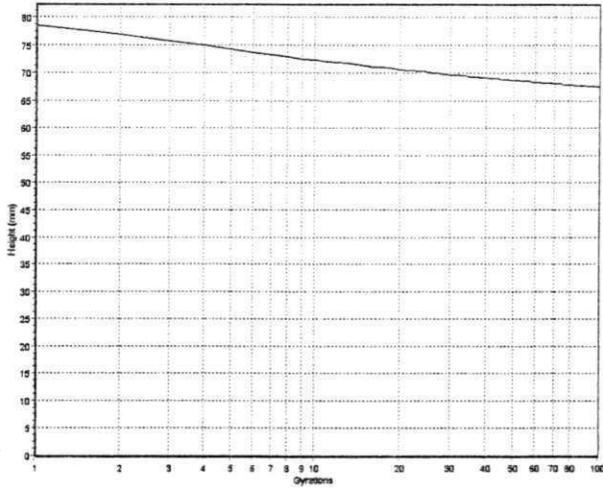
Industrial Process Controls (Australia) Limited

Time: 11:48

Diameter: 100mm

MaxDensity: 2432 (kg/m3)

Comment:



SERVOPAC Version 1.26

Run number: 1940

Date: 17/03/11

Batch: 9% MA

Weight: 1200(g)

Vertical stress: 600kPa

Rate: 30 (gyrn/min)

Control mode: 1000 kPa (shear stress)

Termination: 100 gyrations

At termination: Gyration=100

Density=2269,59kg/m3

Height=67,32mm

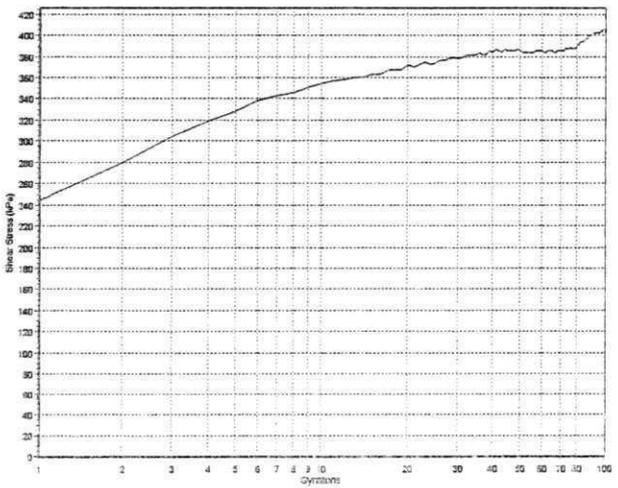
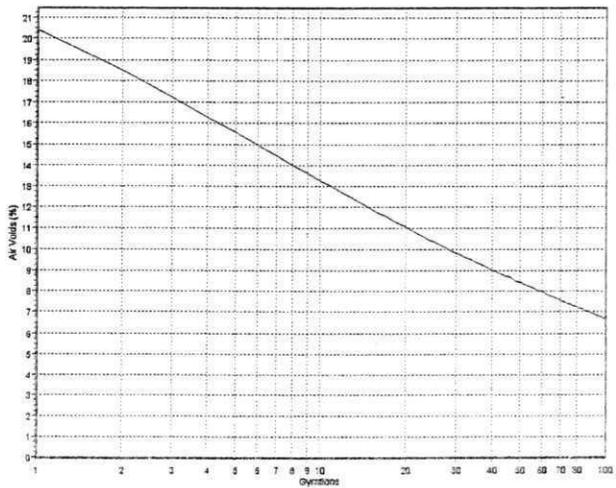
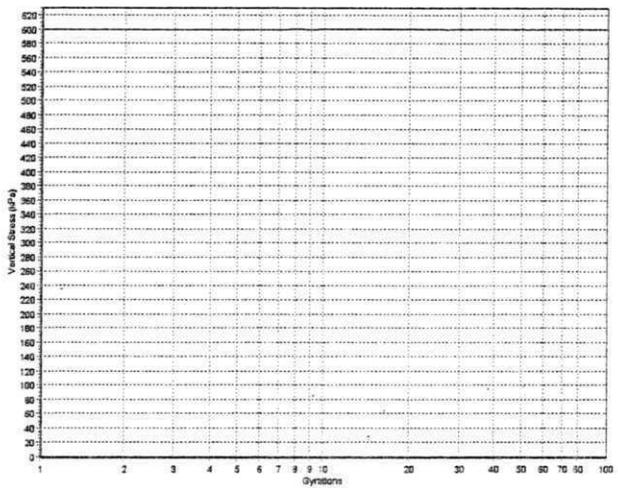
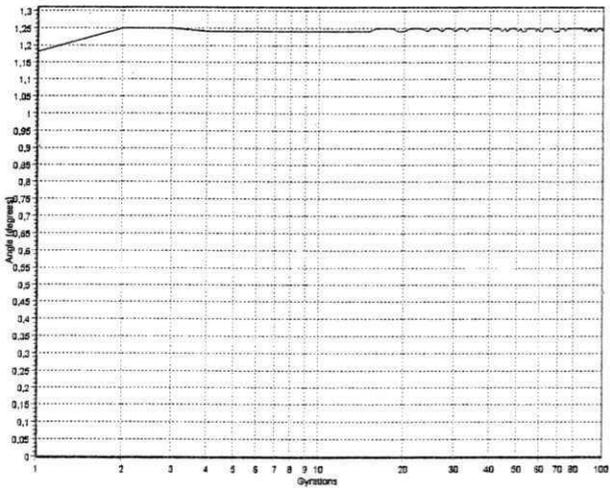
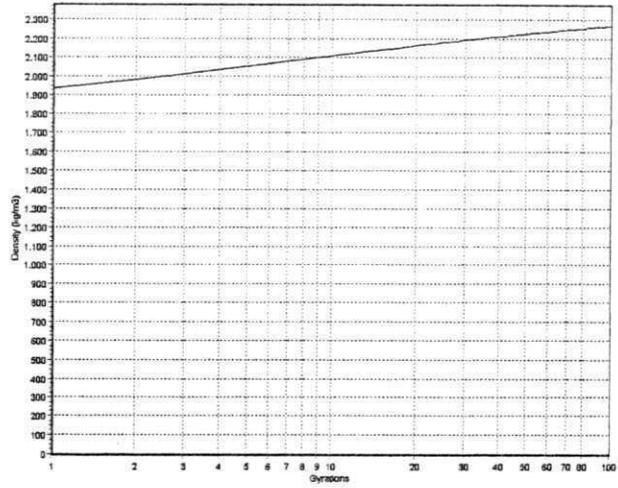
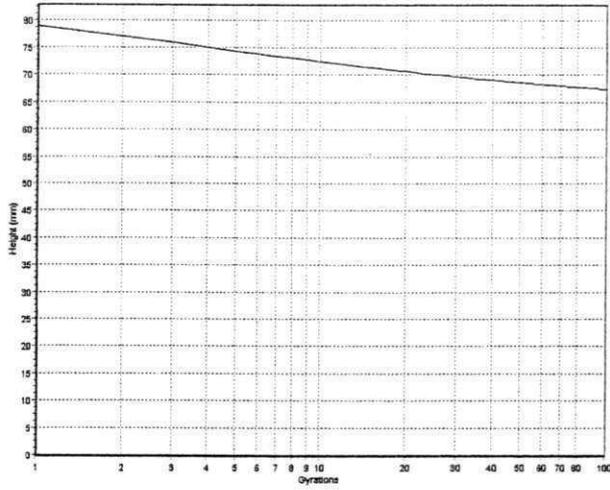
Industrial Process Controls (Australia) Limited

Time: 11:43

Diameter: 100mm

MaxDensity: 2432(kg/m3)

Comment:



SERVOPAC Version 1.26

Run number: 1939

Date: 17/03/11

Industrial Process Controls (Australia) Limited

Time: 11:37

Batch: TEST

Weight: 1200(g)

Diameter: 100mm

MaxDensity: 2432(kg/m3)

Vertical stress: 600kPa

Rate: 30 (gyrn/min)

Comment:

Control mode: 1000 kPa (shear stress)

Termination: 100 gyrations

At termination: Gyration=100 Density=2306,25kg/m3 Height=66,25mm

