

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA

E ENGENHARIA DOS MATERIAIS

CAMPUS I – CAMPINA GRANDE

**EFEITO DA ADIÇÃO DOS ÓLEOS DE RICINUS COMMUNIS E LINUS  
USITATISSIMUM NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO CIMENTO  
ASFÁLTICO DE PETRÓLEO PURO E MODIFICADO**

Fabiano Pereira Cavalcante

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em  
Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade  
Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos  
para obtenção do título de Doutor em Engenharia de  
Materiais

Campina Grande – Paraíba

Fevereiro de 2016

**FABIANO PEREIRA CAVALCANTE**

**EFEITO DA ADIÇÃO DOS ÓLEOS DE RICINUS COMMUNIS E LINUS  
USITATISSIMUM NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO CIMENTO  
ASFÁLTICO DE PETRÓLEO PURO E MODIFICADO**

TESE SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE MATERIAIS.

Orientador: Profº Gelmires de Araújo Neves, D.Sc.

Co-Orientador: Profº John Kennedy Guedes Rodrigues, D.Sc.

Campina Grande – Paraíba

Fevereiro de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- C376e Cavalcante, Fabiano Pereira.  
Efeito da adição dos óleos de ricinus communis e linus usitatissimum nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo puro e modificado / Fabiano Pereira Cavalcante. – Campina Grande, 2016.  
301 f. : il. color.
- Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.  
"Orientação: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves, John Kennedy Guedes Rodrigues".  
Referências.
1. Reologia. 2. Polímero. 3. Óleos de Mamona e Linhaça. 4. Cimentos Asfálticos de Petróleo – Reologia. I. Neves, Gelmires de Araújo. II. Rodrigues, John Kennedy Guedes. III. Título.
- CDU 532.135(043)

FABIANO PEREIRA CAVALCANTE

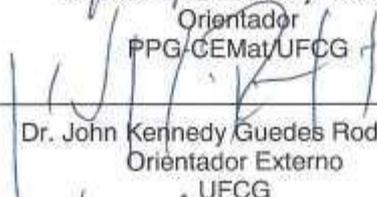
**EFEITO DA ADIÇÃO DOS ÓLEOS RICINUS COMMUNIS E LINUS USITATISSIMUM  
NAS PROPRIEDADES DO CIMENTO ASFALTICO DE PETRÓLEO PURO E  
MODIFICADO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito parcial à obtenção do título de **Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais**.

Aprovado em: 29/02/2016



Dr. Gelmires de Araújo Neves  
Orientador  
PPG-CEMat/UFCG



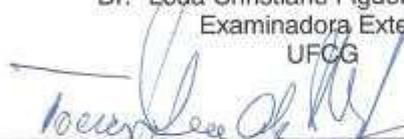
Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues  
Orientador Externo  
UFCG



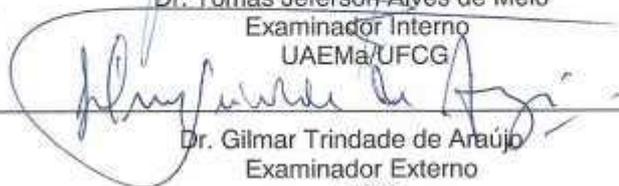
Dr.ª Kamila Lima Vasconcelos  
Examinadora Externa  
USP



Dr.ª Leda Christiane Figueiredo Lucena  
Examinadora Externa  
UFCG



Dr. Tomás Jeferson Alves de Mélo  
Examinador Interno  
UAEMA/UFCG



Dr. Gilmar Trindade de Araújo  
Examinador Externo  
UFCG

“Há três caminhos para o fracasso: ***não ensinar*** o que se sabe, ***não praticar*** o que se ensina, e ***não perguntar*** o que se ignora.” (São Beda o venerável)

# DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa  
Alexsandra e Fabiano Filho pela paciência,  
compreensão e por serem o estímulo da minha  
vida.

## **A G R A D E C I M E N T O S**

A Deus, fonte de amor e sabedoria.

Ao meu pai Pedro Pereira Cavalcante (in memoriam) e a minha mãe M<sup>ª</sup> Madalena de Oliveira Cavalcante (in memoriam), pelos ensinamentos de honestidade, fraternidade, gratidão e amor.

A minha esposa Alexandra e Fabiano Filho, pelo incentivo, carinho, compreensão, amizade e amor durante todo o desenvolvimento desse trabalho.

Ao meu irmão Pedro Pereira e minha cunhada Rute Oliveira, pelos ensinamentos e apoio em todos os momentos da minha vida. Amo vocês!

Ao professor Gelmires de Araújo Neves, pela orientação e disponibilidade em todos os momentos dessa pesquisa.

Ao professor John Kennedy Rodrigues, pela orientação, ensinamentos, paciência, incentivo, sugestões, amizade e pelo exemplo de profissionalismo e simplicidade que foram fundamentais para que eu conseguisse vencer mais uma etapa da minha vida. Obrigado, mestre!

Aos professores Lêda Lucena e Adriano Lucena, pelas contribuições ao longo dessa pesquisa.

À professora Kamila Lima Vasconcelos, pela participação e contribuições na banca examinadora.

Ao professor Gilmar Trindade de Araújo, pela participação e contribuições na banca examinadora.

Ao professor Tomás Jeferson Alves de Melo, pela participação e contribuições na banca examinadora.

Ao aluno Daniel, pela grande ajuda nos ensaios e sempre muito prestativo.

Ao professor Arimatéia, pelas sugestões e contribuições .

À professora Ana Maria, pela ajuda com os ensaios de FTIR.

A eng<sup>a</sup> Ivana Gomes pelo apoio e contribuições.

Aos técnicos, Jadilson Trigueiro e Joseildo Cunha, pelo apoio na fase laboratorial.

Aos meus irmãos Antônio (in memoriam), João, Fátima, Wilma e Lina, pelo apoio e incentivo.

Ao amigo Leonardo Rodrigues, pelo incentivo e apoio ao longo dessa pesquisa.

E a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização desse trabalho.

Muito Obrigado!

## RESUMO

A redução das temperaturas durante a produção e a aplicação das misturas betuminosas proporciona benefícios de sustentabilidade evidentes a curto, médio e longo prazo, os quais estão relacionados a impactos positivos sociais, econômicos e ambientais. Os aditivos naturais com origem em oleaginosas, tais como: a palma, a soja, o girassol, o amendoim, a linhaça e a mamona se constituem, potencialmente, como agentes viáveis para a redução da temperatura de usinagem e de compactação (TUC) ao serem incorporados ao CAP que integrará as misturas asfálticas. Este trabalho teve como objetivo o estudo dos efeitos da adição de oleaginosas, tais como o óleo de Mamona e o de Linhaça, sobre as Propriedades Reológicas dos Cimentos Asfálticos de Petróleo. Foram observados os comportamentos reológicos dos CAPs convencional (CAP 50/70) e modificado (CAP 55/75) considerando percentuais de 4%, 5% e 6% de óleo, bem como as propriedades mecânicas das misturas asfálticas dosadas pelos procedimentos Marshall e Superpave. Os resultados reológicos dos CAPs com a adição do óleo de Linhaça apresentaram valores melhores do que aqueles obtidos com a adição do óleo de Mamona, segundo os parâmetros relacionados aos ensaios de penetração, de ponto de amolecimento, de viscosidade rotacional e de reologia (MSCR) quando as mostras foram submetidas ao envelhecimento a curto prazo (RTFO). Para as misturas asfálticas estudadas foram obtidas uma melhor adesividade e coesão, com conseqüente maior resistência à ação deletéria da água quando os corpos de provas foram submetidos ao ensaio de dano por umidade induzida (Lottman modificado) e ao ensaio de desgaste Cântabro, cujos resultados foram significativamente superiores aos das misturas compostas por CAPs na condição natural. Infere-se que as oleaginosas, na proporção estudada de 5%, podem ser utilizadas como aditivos, a fim de melhorar as propriedades reológicas dos Cimentos Asfálticos, convencional e modificado, com significativa diminuição do poder oxidativo inerente ao aumento de temperatura e, conseqüentemente, melhoria das propriedades mecânicas das misturas asfálticas.

**Palavras Chave:** óleo de Mamona, óleo de Linhaça, polímero, propriedades reológicas, envelhecimento, FTIR, propriedades mecânicas, dosagem.

## ABSTRACT

The decrease in temperature during the production and application of asphalt provides evident sustainability benefits, in the short, medium and long term, which are related to social, economic and environmental positive impacts. Natural additives derived from oilseeds such as palm, soy, sunflower, peanut, linseed and castor beans are potential viable agents to reduce the mixing and compaction temperature (TUC) to be incorporated into the CAP that will make the asphalt mixtures. This study aims to analyze the effects of adding oil, especially the Castor and linseed oil, on the Rheological Properties of the Petroleum Asphalt Cement. Conventional rheological behavior CAPs were observed (CAP 50/70) and modified (CAP 55/75) considering percentage of 4%, 5% and 6% of the oil, as well as the mechanical properties of asphalt mixtures dosage by Marshall and Superpave procedures. The rheological results of CAPs with the addition of linseed oil showed better results than those obtained with the addition of Castor beans oil, according to the parameters related to the penetration tests, softening point, rotational viscosity and rheology (MSCR), when the samples were subjected to short-term ageing (RTFO). For the asphalt mixtures, it was obtained a better adhesion and cohesion what resulted in a greater resistance to deleterious action of water when the test samples were subjected to induced moisture damage test (modified Lottman) and the Cantabro wear test whose results were significantly better compared to the blends with CAPs in natural condition. It can be inferred that the oilseeds, in the proportion of 5%, can be used as additives for improving the rheological properties of asphalt, conventional and modified Cement, with a significant reduction in oxidative power inherent to temperature increase, and, consequently, with the improvement of mechanical properties of asphalt mixtures.

**Key Words:** Castor beans oil, linseed oil, polymer, rheological properties, aging, FTIR, mechanical properties, dosage.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 : Gráfico da evolução das condições do pavimento (Fonte: <a href="http://www.cnt.org.br/">http://www.cnt.org.br/</a> ). .....	1
Figura 1.2 : Ranking de qualidade das rodovias dos países da América do Sul – 2014 (CNT, 2014).....	2
Figura 1.3 : Matérias-primas mais adequadas para produção de biodiesel por região (ESTEVES & PEREIRA, 2015).....	4
Figura 2.1 : Layout de separação química do ligante (CORBETT, 1969).....	9
Figura 2.2 : Estrutura hipotética de asfaltenos (ZANZOTTO, 2001).....	10
Figura 2.3 : Apresentação do modelo de estrutura coloidal segundo Yen (SILVA, 2005 a). .....	10
Figura 2.4 : Influência da origem na composição química (SHULGA et. al., 2012). .....	12
Figura 2.5 : Fração SARA para vários CAPS antes e após 80 min e 340 min de envelhecimento no RTFO adaptado de (LESUEUR, 2009).....	12
Figura 2.6 : Modelo coloidal original: ligante sol e gel adaptado de (MOTHÉ, 2009). .....	13
Figura 2.7 : Envelhecimento do ligante asfáltico nas etapas de construção e de utilização do pavimento. Adaptado de (WHITEOAK, 1991). .....	16
Figura 2.8 : Esquema de classificação das misturas asfálticas com a temperatura de usinagem adaptado de (FHWA, 2008).....	18
Figura 2.9 : Consumo de energia e de emissão de gases durante a produção de misturas Asfálticas (NELSON FILHO, 2013). .....	19
Figura 2.10: Derivados do ácido ricinoléico: hidroxila, carboxila e dupla ligação. ....	24
Figura 2.11: Produção de mamona dos maiores produtores mundiais, entre 2011 e 2013 (FAO, 2013)..	26
Figura 2.12 : Flores de Linho (FONSECA, 2009). .....	27
Figura 2.13 : Variedade da linhaça. (a) marrom; (b) dourada (GALVÃO, 2009).....	27
Figura 2.14 : Posições nas cadeias graxas mais propensas à oxidação (MELO, 2010). .....	29
Figura 2.15: (a) Ácido esteárico C18:0; (b) Ácido oleico C18:1; (c) Ácido oleico C18:2; (d) Ácido oleico linolênico C18:3 (MELO, 2010).....	30
Figura 2.16 : Interações intermoleculares de Van der Waals nas moléculas graxas (a) e configuração (cis)/(trans) (b) (MELO, 2010).....	30
Figura 2.17: Distribuição dos principais países produtores de biodiesel no mundo no ano de 2005 (OSAKI & BATALHA, 2008). .....	32

Figura 2.18 : Principais oleaginosas esmagadas nas indústrias brasileiras no ano de 2006 (OSAKI & BATALHA, 2008).	33
Figura 2.19: Produção de biodiesel de 2005 a 2014 no Brasil.	33
Figura 2.20 : Produção de biodiesel de 2005 a 2014 no Brasil.	33
Figura 2.21: Preço da tonelada de óleo de Mamona e de Linhaça (BIOMERCADO, 2016).	34
Figura 2.22: Resultados de Resistência à Tração Diametral em função do acréscimo de óleo de Mamona (SOUZA, 2012).	35
Figura 2.23: Resultados do ensaio Lottman Modificado em função do acréscimo de óleo de Mamona (SOUZA, 2012).	35
Figura 2.24: Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência em função do acréscimo de óleo de Mamona (SOUZA, 2012).	35
Figura 2.25 : Comparação entre o CAP 30/45 puro e modificado pelos óleos vegetais.	37
Figura 2.26 : Comportamento ideal dos materiais (Adaptado de FAXINA, 2006).	41
Figura 2.27 : Ilustração do funcionamento do reômetro de cisalhamento dinâmico (ROHDE, 2007).	43
Figura 2.28 : Ilustração do funcionamento do reômetro de cisalhamento dinâmico (SOARES, 2007).	44
Figura 2.29 : Ciclos de aplicação de tensões e deformações durante a realização do ensaio de MSCR com o DSR (José Júnior, 2015).	45
Figura 2.30 : Localização das deformações em um ciclo do ensaio de MSCR. (SOBREIRO, 2014).	46
Figura 2.31 : Relação entre a compliância não-recuperável e o percentual de recuperação a 3200 Pa (HOUSSAIN, et. Al. 2015).	48
Figura 2.32 : Esquema de funcionamento do viscosímetro rotacional (ROHDE , 2007).	49
Figura 2.33 : Esquema do ensaio com o reômetro de viga à flexão para ligantes asfálticos. (ROHDE, 2007).	49
Figura 2.34 : Ilustração do ensaio de tração direta (ROHDE, 2007).	50
Figura 2.35 : Tipos de produtos de oxidação formados durante o envelhecimento do asfalto (LUCENA, 2005).	50
Figura 2.36 : Espectros de absorção na região do infravermelho de amostras CAP antes e após o teste de RTFO, região 400-4000cm <sup>-1</sup> Baseline: Linear. Filme de CHCl <sub>3</sub> (ARAÚJO, 2007).	51
Figura 2.37 : Espectro FTIR do CAP 50/70 em diferentes tempos de exposição UV (SILVA, 2005).	51
Figura 2.38 : Espectro do infravermelho do óleo de Mamona e do biodiesel metílico (GALVÃO, 2007).	52

Figura 2.39: Espectros Vibracionais no Infravermelho do (a) óleo de linhaça natural (OL_00) e (b) filme do óleo de linhaça em processo de cura (OL_01) (FONSECA & YOSHIDA, 2009).....	53
Figura 2.40 : Banda de absorção no infravermelho da banda C=O do óleo de linhaça natural (OL_00) e do filme oxidado (OL_01) (GALVÃO, 2007). .....	53
Figura 2.41 : Etapas envolvidas no processo de auto-oxidação do óleo de Linhaça (FONSECA & YOSHIDA, 2009).....	54
Figura 3.1 : Sequência de procedimentos das dosagens .....	55
Figura 3.2 : Foto da cal hidratada. ....	57
Figura 3.3 : Foto do Óleo de Mamona. ....	58
Figura 3.4 : Foto do óleo de Linhaça. ....	58
Figura 3.5 : Características físico-químicas do óleo de Linhaça.....	59
Figura 3.6 : Misturador mecânico com controladores de temperatura e rotações UAEMA/UFCEG. ....	60
Figura 3.7 : Sequência de misturas. ....	60
Figura 3.8 : Ssequência de atividades para a caracterização do CAP. ....	61
Figura 3.9 : Equipamento de RTFO.....	62
Figura 3.10 : Penetrômetro automático (LEP/UFCEG). ....	62
Figura 3.11 : Aparato para ensaio ponto de amolecimento, método anel e bola. ....	63
Figura 3.12 : Equipamentos de ensaio de recuperação elástica. ....	65
Figura 3.13 : Equipamento de viscosidade rotacional (Brookfield), LEP/UAEC/UFCEG. ....	65
Figura 3.14 : Reômetro de cisalhamento dinâmico do LEP/UAEC/UFCEG.....	67
Figura 3.15 : Cálculo das áreas C=O e C-C (adaptado de JIA et. al., 2013). ....	68
Figura 3.16 : Sequência de atividades para a caracterização dos agregados.....	69
Figura 3.17 : Máquina para o ensaio de Abrasão Los Angeles. ....	73
Figura 3.18 : Crivos redutores circulares e quadrados. ....	74
Figura 3.19 : Ensaio de equivalente areia. ....	75
Figura 3.20 : Compactador giratório do LEP/UAEC/UFCEG. ....	80
Figura 3.21 : Sequência da dosagem Superpave (BERNUCCI, et. al., 2006). ....	81
Figura 3.22 : Sequência de atividades para determinação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas.....	83

Figura 3.23 : Equipamento a ser utilizado para o ensaio de RT do LEP/UAEC/UFCG. ....	83
Figura 3.24 : Sequência do ensaio de resistência à tração por compressão diametral. ....	84
Figura 3.25 : Sequência do ensaio de módulo de resiliência. ....	85
Figura 3.26 : Equipamento para ensaio de Módulo de Resiliência do LEP/UAEC/UFCG. ....	85
Figura 3.27 : Sequência do ensaio de resistência a umidade induzida (Lottman modificado). ....	87
Figura 3.28 : Sequência do ensaio de fadiga. ....	89
Figura 3.29 : Sequência do ensaio de deformação permanente (Flow Number). ....	90
Figura 4.1: Resultados em gráfico de Penetração. ....	93
Figura 4.2: Resultados em gráfico de Penetração Retida. ....	94
Figura 4.3: Resultados em gráfico do Ponto de Amolecimento. ....	95
Figura 4.4: Resultados em gráfico do Aumento do Ponto de Amolecimento. ....	95
Figura 4.5: Resultado em gráfico de perdas de massa. ....	97
Figura 4.6: Resultados em gráfico de recuperação elástica. ....	98
Figura 4.7: Resultados em gráfico de viscosidades rotacionais a 135°C para os ligantes puros. ....	100
Figura 4.8: Resultados em gráfico de viscosidades rotacionais a 150°C para os ligantes puros. ....	101
Figura 4.9: Resultados em gráfico de viscosidades rotacionais a 177°C para os ligantes puros. ....	101
Figura 4.10: Resultados de viscosidades rotacionais nas diferentes temperaturas para ligantes puros. ....	102
Figura 4.11: Resultados em gráfico de viscosidades rotacionais a 135°C para os ligantes após RTFO. ....	104
Figura 4.12: Resultados em gráfico de viscosidades rotacionais a 150°C para os ligantes após RTFO. ....	104
Figura 4.13: Resultados em gráfico de viscosidades rotacionais a 177°C para os ligantes após RTFO. ....	104
Figura 4.14: Viscosidades rotacionais nas diferentes temperaturas para os ligantes após RTFO. ....	105
Figura 4.15: Resultados em gráfico do Índice de Envelhecimento – IE para temperatura de 135 °C. ....	106
Figura 4.16: Gráfico dos acréscimos de viscosidade - AV e decréscimos de viscosidade - DV. ....	107
Figura 4.17: Curvas de variação da viscosidade rotacional em função da temperatura para o CAP puro com adição de óleo de Mamona. ....	109
Figura 4.18: Curvas de variação da viscosidade rotacional em função da temperatura para o CAP puro com adição de óleo de Linhaça. ....	110
Figura 4.19: Curvas de variação da viscosidade rotacional em função da temperatura para o CAP modificado com adição de óleo de Mamona. ....	110

Figura 4.20: Curvas de variação da viscosidade rotacional em função da temperatura para o CAP modificado com adição de óleo de Linhaça.....	111
Figura 4.21: Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura – CAP 50/70 + OM antes do RTFO.....	112
Figura 4.22: Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura – CAP 55/75 + OM antes do RTFO.....	113
Figura 4.23: Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura – CAP 50/70 + OL antes do RTFO.....	113
Figura 4.24: Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura – CAP 55/75 + OL antes do RTFO.....	114
Figura 4.25: Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura – CAP 50/70 + OM após o RTFO.....	114
Figura 4.26: Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura – CAP 55/75 + OM após RTFO.....	115
Figura 4.27: Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura – CAP 50/70 + OL após o RTFO.....	115
Figura 4.28: Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura – CAP 55/75 + OL após o RTFO.....	115
Figura 4.29: Parâmetro $G^* \cdot \sin \delta$ em função da temperatura do CAP 50/70 + OM antes RTFO. ....	117
Figura 4.30: Parâmetro $G^* / \sin \delta$ em função da temperatura – CAP 55/75 + OM antes RTFO. ....	117
Figura 4.31: Parâmetro $G^* / \sin \delta$ em função da temperatura – CAP 50/70 + OL antes RTFO. ....	118
Figura 4.32: Parâmetro $G^* / \sin \delta$ em função da temperatura – CAP 55/75 + OL antes RTFO. ....	118
Figura 4.33: Parâmetro $G^* \cdot \sin \delta$ em função da temperatura – CAP 50/70 + OM após RTFO. ....	119
Figura 4.34: Parâmetro $G^* / \sin \delta$ em função da temperatura – CAP 55/75 + OM após RTFO. ....	119
Figura 4.35: Parâmetro $G^* / \sin \delta$ em função da temperatura – CAP 50/70 + OL após RTFO. ....	119
Figura 4.36: Parâmetro $G^* / \sin \delta$ em função da temperatura – CAP 55/75 + OL após RTFO. ....	120
Figura 4.37: Grau de Desempenho (PG) do CAP puro e modificado com adição dos óleos de Mamona e de Linhaça. ....	120
Figura 4.38: Parâmetro $\tan \delta$ em função da temperatura – CAP 50/70 + OM antes do RTFO. ....	122
Figura 4.39: Parâmetro $\tan \delta$ em função da temperatura – CAP 55/75 + OM antes do RTFO. ....	122
Figura 4.40: Parâmetro $\tan \delta$ em função da temperatura – CAP 50/70 + OL antes do RTFO. ....	122
Figura 4.41: Parâmetro $\tan \delta$ em função da temperatura – CAP 55/75 + OL antes do RTFO. ....	123
Figura 4.42: Parâmetro $\tan \delta$ em função da temperatura – CAP 50/70 + OM após o RTFO. ....	123
Figura 4.43: Parâmetro $\tan \delta$ em função da temperatura – CAP 50/70 + OL após o RTFO. ....	124
Figura 4.44: Parâmetro $\tan \delta$ em função da temperatura – CAP 55/75 + OM após o RTFO. ....	124
Figura 4.45: Parâmetro $\tan \delta$ em função da temperatura – CAP 55/75 + OL após o RTFO. ....	124

Figura 4.46: Curva mestra do CAP 50/70 com adições de Óleo de Mamona. ....	125
Figura 4.47: Curva mestra do CAP 50/70 com adições de Óleo de Linhaça.....	126
Figura 4.48: Curva mestra do CAP 50/70 com adições de Óleo de Mamona e de Linhaça. ....	126
Figura 4.49: Curva mestra do CAP 55/75 com adições de Óleo de Mamona. ....	126
Figura 4.50: Curva mestra do CAP 55/75 com adições de Óleo de Linhaça.....	127
Figura 4.51: Curva mestra do CAP 55/75 com adições de Óleo de Mamona e de Linhaça.....	127
Figura 4.52: Percentuais de recuperação (R) para amostra de CAP 50/70 com adições de Mamona e de Linhaça. ....	130
Figura 4.53: Percentuais de recuperação (R) para amostra de CAP 55/75 com adições de Mamona e de Linhaça. ....	130
Figura 4.54: Compliâncias não-recuperáveis Jnr para amostras de CAP 50/70 com adições de OM e OL. ....	132
Figura 4.55: Compliâncias não-recuperáveis Jnr para amostras de CAP 55/75 com adições de OM e OL. ....	132
Figura 4.56: Relação entre a compliância não-recuperável e o percentual de recuperação a 3200 Pa..	133
Figura 4.57: Espectros FTIR das amostras de CAP 50/70 e com adição de óleo de Mamona antes e após o RTFO.....	136
Figura 4.58: Espectros FTIR das amostras de CAP 50/70 e com adição de óleo de Linhaça antes e após o RTFO.....	136
Figura 4.59: Espectros FTIR das amostras de CAP 55/75 e com adição de óleo de Mamona antes e após o RTFO.....	136
Figura 4.60: Espectros FTIR das amostras de CAP 55/75 e com adição de óleo de Linhaça antes e após o RTFO.....	137
Figura 4.61: Índice de oxidação dos ligantes asfálticos.....	137
Figura 4.62: Índice de aromáticos dos ligantes asfálticos.....	138
Figura 4.63: Índice de alifáticos dos ligantes asfálticos. ....	138
Figura 4.64: Índice de sulfóxidos dos ligantes asfálticos. ....	138
Figura 4.65: Dimensões consideradas para a determinação da forma de agregados (MOURA, 2015). .	140
Figura 4.66: Curva granulométrica dos agregados.....	142
Figura 4.67: Curva de projeto Teórica [Limite Intermediário da Faixa B do DNIT]. ....	143

Figura 4.68: Curva de Fuller da composição dos agregados [Limite Intermediário da Faixa B do DNIT]. .....	143
Figura 4.69: Gráfico da densidade máxima teóricas das composições das misturas asfálticas.....	145
Figura 4.70: Gráfico da massa específica aparente das composições das misturas asfálticas.....	146
Figura 4.71: Gráfico do volume de vazios das composições de misturas asfálticas. ....	146
Figura 4.72: Gráfico dos vazios do agregado mineral das composições das misturas asfálticas.....	146
Figura 4.73: Gráfico da relação betume/vazios das composições das misturas asfálticas. ....	147
Figura 4.74: Gráfico da estabilidade Marshall das composições das misturas asfálticas.....	147
Figura 4.75: Gráfico do volume de vazios das composições de misturas asfálticas. ....	148
Figura 4.76: Gráfico da relação betume/vazios das composições das misturas asfálticas. ....	148
Figura 4.77: Gráfico da estabilidade Marshall das composições das misturas asfálticas.....	149
Figura 4.78: Gráfico da densidade máxima teóricas das composições das misturas asfálticas.....	150
Figura 4.79: Gráfico da massa específica aparente das composições das misturas asfálticas.....	151
Figura 4.80: Gráfico do volume de vazios das composições de misturas asfálticas. ....	151
Figura 4.81: Gráfico dos vazios do agregado mineral das composições das misturas asfálticas.....	151
Figura 4.82: Gráfico da relação betume/vazios das composições das misturas asfálticas. ....	152
Figura 4.83: Gráfico da estabilidade Marshall das composições das misturas asfálticas.....	152
Figura 4.84: Gráfico do volume de vazios das composições de misturas asfálticas. ....	153
Figura 4.85: Gráfico da relação betume/vazio das composições das misturas asfálticas. ....	153
Figura 4.86: Gráfico da estabilidade Marshall das composições das misturas asfálticas.....	154
Figura 4.87: Curva de Fuller da composição dos agregados [Limite Inferior da Faixa B do DNIT]. ....	155
Figura 4.88: Curva de Fuller da composição dos agregados [Limite Intermediário da Faixa B do DNIT]. .....	155
Figura 4.89: Curva de Fuller da composição dos agregados [Limite Superior da Faixa B do DNIT]. ....	156
Figura 4.90: Gráfico da relação Volume de Vazios e Teor de Ligante.....	158
Figura 4.91: Gráfico da Resistência à tração por compressão diametral. ....	160
Figura 4.92: Gráfico dos módulos de Resiliência.....	162
Figura 4.93: Gráfico da Relação entre MR/RT.....	163

Figura 4.94: Gráfico dos resultados do ensaio de dano por umidade induzida (Lottman Modificado).....	165
Figura 4.95: Gráfico dos resultados do ensaio de desgaste Cântabro. ....	166
Figura 4.96: Gráfico dos modelos de fadiga em função da diferença de tensões. ....	168
Figura 4.97: Gráfico dos modelos de fadiga em função da deformação resiliente específica. ....	170
Figura 4.98: Gráfico dos Resultados de deformação permanente (Flow Number).....	172

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 : Proposição do SHRP para as interações existentes entre as frações asfálticas e seus compostos relacionados. ....	14
Tabela 2.2 : Viscosidade de óleos vegetais, em função da temperatura (COSTA, 2006). ....	25
Tabela 2.3 : Valores físicos de referência do óleo de Mamona (COSTA, 2006). ....	26
Tabela 2.4 : Constituintes químicos do óleo de Mamona (COSTA, 2006). ....	26
Tabela 2.5 : Composição típica de ácidos graxos no óleo de linhaça natural (FONSECA, 2009). ....	27
Tabela 2.6 : Índice de oxidação para os óleos vegetais (MELO, 2010). ....	29
Tabela 2.7 : Identificação dos asfaltos modificados. (LENI et. al. 2012). ....	36
Tabela 2.8 : Comparação entre o CAP 50/70 e modificado com cera de carnaúba (LENI et. al. (2012)..	36
Tabela 2.9 : Comparação entre o CAP 30/45 puro e modificado pelos óleos vegetais. ....	37
Tabela 2.10 : Comparação dos resultados mecânicos dos CAPS puros e modificados com óleos vegetais. ....	38
Tabela 2.11: Resultados do ensaio de ponto de amolecimento: CAP puro; CAP + Moringa variando de 1%, 3% e 7%. ....	39
Tabela 2.12: Resultados do ensaio de penetração : CAP puro; CAP + Moringa variando de 1%, 3% e 7%. ....	39
Tabela 2.13: Resultados da perda de massa após o RTFO. ....	39
Tabela 2.14 : Classificação quanto ao valor de Jnr de acordo com o critério proposto pelo FHWA. (AASHTO M320, 2010). ....	47
Tabela 2.15: Percentual de recuperação de acordo com o critério proposto pelo FHWA (D'Angelo, 2010) ....	47
Tabela 3.1: Caracterização dos agregados graúdos e miúdos. ....	56
Tabela 3.2 : Composição química da cal hidratada (Fonte: CAGEL Ltda). ....	56
Tabela 3.3 : Composição química da cal hidratada (Fonte: CAGEL Ltda). ....	57
Tabela 3.4 : Características físico-química do óleo de Mamona (SOUZA, 2012). ....	58
Tabela 3.5 : Requisitos de dosagem de concreto asfáltico – DNIT 031/2006-ES (DNIT, 2006). ....	79
Tabela 3.6 : Requisitos de dosagem de concreto asfáltico modificado por polímero – DNIT ES 385/99 (DNIT, 1999). ....	79

Tabela 3.7 : Número de giros especificados na norma de dosagem Superpave (BERNUCCI, et. al., 2006). .....	81
Tabela 4.1: Resultados de estabilidade a estocagem. ....	91
Tabela 4.2: Resultados de Penetração e Penetração Retida. ....	93
Tabela 4.3: Resultados do Ponto de Amolecimento. ....	95
Tabela 4.4: Resultados de perda de massa dos ligantes após o RTFO. ....	96
Tabela 4.5: Resultados em gráfico de recuperação elástica. ....	98
Tabela 4.6: Resultados de viscosidades rotacionais para os ligantes puros. ....	99
Tabela 4.7: Resultados de viscosidades rotacionais para os ligantes após o RTFO. ....	103
Tabela 4.8: Resultados do Índice de Envelhecimento – (IE). ....	106
Tabela 4.9: Temperaturas de usinagem e compactação para os ligantes asfálticos. ....	109
Tabela 4.10: Módulo Complexo ( $G^*$ ) versus temperatura antes e após o RTFO. ....	112
Tabela 4.11: $\tan\delta$ versus temperatura antes e após o RTFO. ....	121
Tabela 4.12: Percentuais de recuperação (R). ....	129
Tabela 4.13: Compliâncias não-recuperáveis ( $J_{nr}$ ) e $J_{nr}$ , dif. ....	131
Tabela 4.14: Classificação do nível de tráfego dos ligantes asfálticos quanto ao valor do $J_{nr}$ . ....	133
Tabela 4.15 Bandas de infravermelho características de um ligante asfáltico (SILVA, 2005). ....	135
Tabela 4.16: Peso específico real dos agregados graúdos e miúdos utilizados nas misturas asfálticas. ....	139
Tabela 4.17: Resultados do ensaio de absorção (ME 086/94). ....	140
Tabela 4.18: Resultados do Índice de forma (ME 086/94). ....	141
Tabela 4.19: Distribuição granulométrica dos agregados. ....	142
Tabela 4.20: Composição dos agregados estabelecida com a aproximação do Limite Intermediário [Faixa B do DNIT]. ....	142
Tabela 4.21: Composição granulométrica para o teor de 3,5% de ligante asfáltico. ....	144
Tabela 4.22: Composição granulométrica para o teor de 4,0% de ligante asfáltico. ....	144
Tabela 4.23: Composição granulométrica para o teor de 4,5% de ligante asfáltico. ....	144
Tabela 4.24: Composição granulométrica para o teor de 5,0% de ligante asfáltico. ....	144
Tabela 4.25: Composição granulométrica para o teor de 5,5% de ligante asfáltico. ....	144

Tabela 4.26: Valores da densidade máxima teórica das composições de misturas asfálticas. ....	144
Tabela 4.27: Valores da massa específica aparente das composições de misturas asfálticas. ....	145
Tabela 4.28: Valores de volumes de vazios das composições das misturas asfálticas. ....	145
Tabela 4.29: Valores dos vazios do agregado mineral das composições das misturas asfálticas. ....	145
Tabela 4.30: Valores da relação betume/vazios das composições das misturas asfálticas. ....	145
Tabela 4.31: Valores da estabilidade Marshall das composições das misturas asfálticas. ....	145
Tabela 4.32: Composição granulométrica para o teor de 4,7% de ligante asfáltico. ....	148
Tabela 4.33: Valores obtidos para a composição de 4,7%. ....	148
Tabela 4.34: Valores da densidade máxima teórica das composições de misturas asfálticas. ....	150
Tabela 4.35: Valores da massa específica aparente das composições de misturas asfálticas. ....	150
Tabela 4.36: Valores de volumes de vazios das composições das misturas asfálticas. ....	150
Tabela 4.37: Valores dos vazios do agregado mineral das composições das misturas asfálticas. ....	150
Tabela 4.38: Valores da relação betume/vazios das composições das misturas asfálticas. ....	150
Tabela 4.39: Valores da estabilidade Marshall das composições das misturas asfálticas. ....	150
Tabela 4.40: Composição granulométrica para o teor de 4,7% de ligante asfáltico. ....	153
Tabela 4.41: Valores obtidos para a composição de 4,7%. ....	153
Tabela 4.42: Composição dos agregados estabelecida com a aproximação do Limite Inferior [Faixa B do DNIT]. ....	154
Tabela 4.43: Composição dos agregados estabelecida com a aproximação do Limite Intermediário [Faixa B do DNIT]. ....	155
Tabela 4.44: Composição dos agregados estabelecida com a aproximação do Limite Superior [Faixa B do DNIT]. ....	156
Tabela 4.45: Parâmetros volumétricos em função dos teores de CAPs iniciais. ....	156
Tabela 4.46: Composição granulométrica para o teor de 3,83% de ligante asfáltico. ....	157
Tabela 4.47: Composição granulométrica para o teor de 4,33% de ligante asfáltico. ....	157
Tabela 4.48: Composição granulométrica para o teor de 4,83% de ligante asfáltico. ....	157
Tabela 4.49: Composição granulométrica para o teor de 5,33% de ligante asfáltico. ....	157
Tabela 4.50: Dosagem para os teores de CAP estimados (curva intermediária). ....	158
Tabela 4.51: Resultados de resistência à tração por compressão diametral. ....	159

Tabela 4.52: Resultados de módulo de resiliência a 25°C.....	161
Tabela 4.53: Resultados do ensaio de dano por umidade induzida (Lottman Modificado).....	164
Tabela 4.54: Resultados do ensaio de desgaste Cântabro. ....	166
Tabela 4.55: Modelo de fadiga em função da diferença de tensões. ....	167
Tabela 4.56: Variação da vida de fadiga com o nível de diferença de tensões aplicado.....	168
Tabela 4.57: Modelo de fadiga em função da deformação resiliente específica. ....	170
Tabela 4.58: Variação da vida de fadiga com o nível de tensão de tração aplicado. ....	171
Tabela 4.59: Resultados de deformação permanente (Flow Number). ....	172
Tabela 4.60: Gráfico dos Resultados de deformação permanente (MOTTA, 2011).....	173
Tabela 4.61: Estimativa de energia necessária para secar/vaporizar a água e aquecer os agregados na usinagem de 160t. ....	174
Tabela 4.62: Preços de GLP na Paraíba (Fonte: <a href="http://www.anp.gov.br">http://www.anp.gov.br</a> - acesso em 18.12.2015).....	175

## LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APA	Aumento do ponto de amolecimento
ASTM	American Society for Testing and Material
ATR	Attenuated Total Reflectance
AV	Acrécimo de viscosidade
BBR	Bending Beam Rheometer
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CBUQ	Concreto asfáltico usinado a quente
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DV	Decréscimo de viscosidade
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNIT	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
DSR	Dynamic Shear Rheometer
DTT	Direct Tension Test
EAPA	Associação Europeia de Pavimentação
FAO	Food and Agriculture Organization
FHWA	The Federal Highway Administration
FN	Flow Number
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier
GM	Grau de modificação
Ic	Instabilidade Coloidal
IE	Índice de envelhecimento
INT	Instituto Nacional de Tecnologia

LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
MR	Módulo de Resiliência
MSCR	Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas
OL	Óleo de Linhaça
OM	Óleo de Mamona
PA	Ponto de Amolecimento
PA <sub>puro</sub>	Ponto de amolecimento do CAP puro
PA <sub>RTFO</sub>	Ponto de amolecimento do CAP puro após o RTFO
PAV	Pressure aging vessel
PEN <sub>mod</sub>	Penetração do CAP modificado com óleo
PEN <sub>puro</sub>	Penetração do CAP puro
PEN <sub>RTFO</sub>	Penetração do CAP após o RTFO
PG	PG Performance Grade
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel
PR	Penetração retida
RBV	Relação betume/vazios
RCRT	Repeated Creep and Recovery
RRt	Relação da Resistência à Tração
RT	Resistência à Tração
RTC	Resistência à tração de corpo de prova condicionado
RTFO	Rolling Thin Film Oven
RTNC	Resistência à tração de corpo de prova não condicionado
S	Creep stiffness
SARA	Saturates, aromatics, resins, and asphaltenes

SBS	Estireno Butadieno Estireno
SGC	Superpave Gyrotory Compactor
SHRP	Strategic Highway Research Program
Superpave	Superior Asphalt Pavements
TC	Temperatura de compactação
TU	Temperatura de usinagem
TUC	Temperatura de usinagem e compactação
UAEC	Unidade Acadêmica de Engenharia Civil
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFS	Universidade Federal de Sergipe
UV	Radiação ultravioleta
VAM	Vazios do agregado mineral
VCB	Vazios preenchidos com ligante
Vv	Volume de vazios
WES	Waterways Experiment Station
WMA	Warm-Mix Asphalt

## LISTAS DE SÍMBOLOS

$\delta$	Ângulo de fase
$\Delta\sigma$	Diferença algébrica entre as tensões;
$\varepsilon_0$	Deformação medida no início de um ciclo de fluência e recuperação
$\varepsilon_C$	Deformação medida no final do ciclo de fluência e início do ciclo de recuperação
$\varepsilon_f$	Deformação medida no final de um ciclo de fluência e recuperação
$\varepsilon_t$	Deformação resiliente específica
$G^*$	Módulo complexo de cisalhamento
$G'$	Módulo elástico recuperável
$G''$	Módulo viscoso não-recuperável
$J_{nr}$	Complância não-recuperável do ligante asfáltico
$J_{nr,diff}$	Diferença percentual entre as complâncias não-recuperáveis nas tensões de 100 e 3.200 Pa
$k_1$ e $n_1$	Parâmetros de fadiga determinados em laboratório
$N_f$	Número de solitações para que ocorra a ruptura da amostra;
$R$	Percentual de recuperação do ligante asfáltico
$\eta_a$	Viscosidade em uma dada condição de envelhecimento
$\eta_0$	Viscosidade inicial do ligante asfáltico
$EA_{AGR}$	Energia para aquecimento dos agregados
$EA_{\text{água}}$	Energia para aquecimento da água
$EV_{\text{água}}$	Energia para vaporização da água
$EV_{\text{vapor}}$	Energia para aquecimento do vapor da água

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 CONDIÇÕES DA MALHA RODOVIÁRIA NACIONAL.....	1
1.2 HIPÓTESE.....	5
1.3 OBJETIVOS .....	6
1.3.1 <i>Geral</i> .....	6
1.3.2 <i>Específicos</i> .....	7
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>8</b>
2.1 INTRODUÇÃO.....	8
2.2 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO - CAP.....	8
2.2.1 <i>Composição Química</i> .....	8
2.2.2 <i>Envelhecimento</i> .....	14
2.3 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS.....	18
2.3.1 <i>Histórico</i> .....	21
2.4 ÓLEO DE MAMONA .....	24
2.5 ÓLEO DE LINHAÇA .....	26
2.6 BIODIESEL A PARTIR DO ÓLEO DE MAMONA E DO ÓLEO DE LINHAÇA .....	31
2.7 PESQUISAS COM OLEAGINOSAS ADICIONADAS AO LIGANTE ASFÁLTICO .....	34
<i>Souza (2012)</i> .....	34
<i>Leni et. al. (2012)</i> .....	36
<i>Silveira et. al. (2014)</i> .....	38
2.8 PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO CAP .....	39
2.8.1 <i>Métodos para Caracterização Reológica dos Ligantes Asfálticos</i> .....	42
2.8.2 <i>Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (Dynamic Shear Rheometer) - DSR</i> .....	43
2.8.3 <i>Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla - MSCR</i> .....	44
2.8.4 <i>Viscosímetro rotacional (Rotational Viscosimeter)</i> .....	48
2.8.5 <i>Reômetro de viga à flexão (Bending Beam Rheometer - BBR)</i> .....	49
2.8.6 <i>Prensa de tração direta (DTT – Direct Tension Test)</i> .....	49
2.9 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER - FTIR .....	50
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>55</b>
3.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS .....	55
3.1.1 <i>Agregados</i> .....	56
3.1.2 <i>Cimento Asfáltico de Petróleo</i> .....	57
3.1.3 <i>Aditivos</i> .....	57
3.2 PRODUÇÃO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS.....	60
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS PURO E COM ADITIVOS. ....	61
3.3.1 <i>Estabilidade à Estocagem</i> .....	61

3.3.2	<i>Envelhecimento a Curto Prazo – RTFO</i>	61
3.3.3	<i>Ensaio de Penetração</i>	62
3.3.4	<i>Ensaio de Ponto de Amolecimento</i>	63
3.3.5	<i>Recuperação Elástica</i>	64
3.3.6	<i>Viscosidade Rotacional</i>	65
3.3.7	<i>Cisalhamento Dinâmico - DSR</i>	66
3.3.8	<i>Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier - FTIR</i>	67
3.4	PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS GRANULARES	68
3.4.1	<i>Granulometria</i>	69
3.4.2	<i>Absorção</i>	69
3.4.3	<i>Densidade específica/massa específica</i>	71
3.4.4	<i>Abrasão Los Angeles</i>	73
3.4.5	<i>Índice de forma</i>	73
3.4.6	<i>Equivalente areia</i>	74
3.4.7	<i>Adesividade</i>	75
3.4.8	<i>Durabilidade</i>	75
3.5	DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	76
3.5.1	<i>Considerações Iniciais</i>	76
3.5.2	<i>Dosagem Marshall</i>	77
3.5.3	<i>Dosagem Superpave</i>	79
3.6	PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	83
3.6.1	<i>Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral - RT</i>	83
3.6.2	<i>Ensaio de Módulo de Resiliência</i>	84
3.6.3	<i>Ensaio de Lottman Modificado</i>	86
3.6.4	<i>Ensaio de Desgaste Cântabro</i>	87
3.6.5	<i>Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral</i>	88
3.6.6	<i>Ensaio de Deformação Permanente (Flow Number)</i>	89
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>91</b>
4.1	ENVELHECIMENTO A CURTO PRAZO - RTFO	91
4.1.1	<i>Estabilidade à Estocagem</i>	91
4.1.2	<i>Ensaio de Penetração</i>	91
4.1.3	<i>Ensaio de Ponto de Amolecimento</i>	94
4.1.4	<i>Perda de Massa</i>	96
4.1.5	<i>Recuperação Elástica</i>	97
4.1.6	<i>Resultado do Ensaio de Viscosidade Rotacional (Brookfield)</i>	98
4.1.7	<i>Determinação das Temperaturas de Usinagem e de Compactação (TUC)</i>	108
4.2	ENSAIOS REOLÓGICOS COM O AUXÍLIO DO REÔMETRO DE CISALHAMENTO DINÂMICO – DSR	111

4.2.1	<i>Avaliação do Módulo de Cisalhamento Dinâmico (<math>G^*</math>) em função da variação de temperatura</i>	111
4.2.2	<i>Grau de Desempenho – PG</i>	116
4.2.3	<i>Avaliação do parâmetro <math>\tan\delta</math> em função da variação de temperatura</i>	120
4.2.4	<i>Avaliação do Módulo Complexo (<math>G^*</math>) em função da varredura de frequência</i>	125
4.2.5	<i>Fluência e Recuperação sobre Tensão Múltipla – MSCR</i>	127
4.3	ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)	134
4.4	PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS GRANULARES	139
4.4.1	<i>Ensaio de Equivalente de Areia</i>	139
4.4.2	<i>Peso Específico Real e Aparente</i>	139
4.4.3	<i>Absorção dos agregados</i>	140
4.4.4	<i>Índice de Forma</i>	140
4.4.5	<i>Abrasão “Los Angeles”</i>	141
4.5	DOSAGEM PELO MÉTODO MARSHALL	141
4.5.1	<i>Enquadramento Granulométrico</i>	141
4.5.2	<i>Obtenção do Teor Ótimo de CAP 50/70</i>	143
4.5.3	<i>Obtenção do Teor Ótimo de CAP 55/75</i>	149
4.6	DOSAGEM PELO MÉTODO SUPERPAVE	154
4.6.1	<i>Obtenção do Teor Ótimo</i>	157
4.7	PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	158
4.7.1	<i>Resistência à Tração por Compressão Diametral - RT</i>	159
4.7.2	<i>Módulo de Resiliência - MR</i>	160
4.7.3	<i>Resistência ao Dano por Umidade Induzida (Lottman modificado) – RRt</i>	163
4.7.4	<i>Resistência ao Desgaste Cântabro</i>	165
4.7.5	<i>Resultado do Ensaio de Fadiga a Tensão Controlada</i>	167
4.7.6	<i>Resultado do Ensaio de Flow Number – FN</i>	171
4.8	ESTIMATIVA DA ECONOMIA DE COMBUSTÍVEL E APLICAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA	173
4.8.1	<i>Estimativa da Economia de Combustível</i>	173
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>176</b>
6.	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	176
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>178</b>
	<b>ANEXO I – ENSAIO COM O REÔMETRO DE CISALHAMENTO DINÂMICO - DSR</b>	<b>192</b>
	<b>ANEXO II – ENSAIO DE FLUÊNCIA E RECUPERAÇÃO SOBRE TENSÃO MÚLTIPLA – MSCR</b>	<b>221</b>
	<b>ANEXO III – ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA</b>	<b>236</b>
	<b>ANEXO IV – ENSAIO DE FADIGA A TENSÃO CONTROLADA.</b>	<b>261</b>

# 1. INTRODUÇÃO

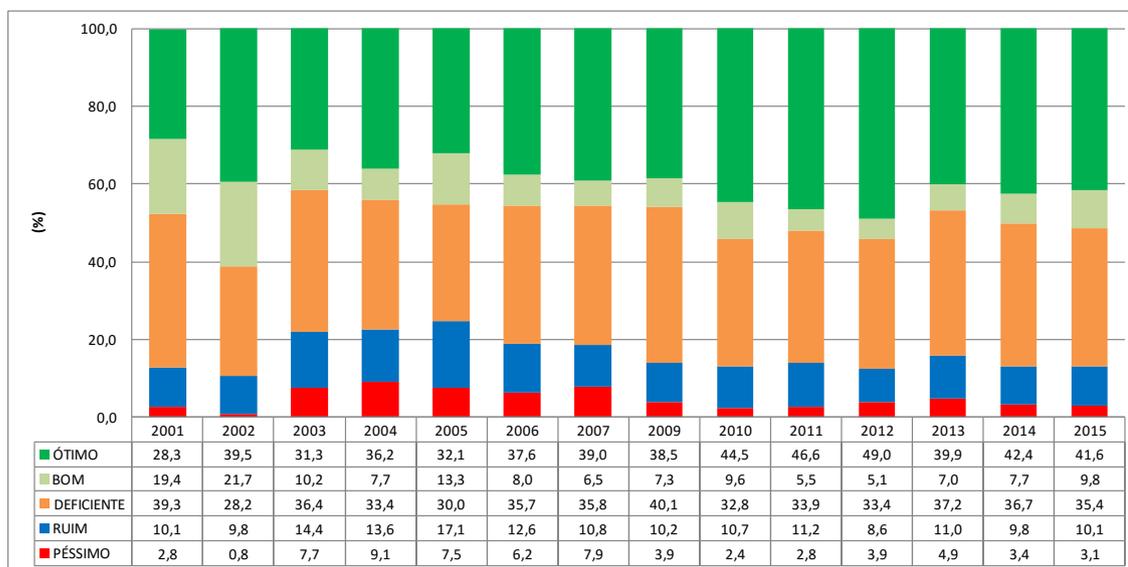
## 1.1 Condições da Malha Rodoviária Nacional

A atual crise econômica mundial e, especificamente, no Brasil suscitou uma redução nos investimentos em todos os setores, sejam eles privados ou públicos. A área de infraestrutura dos transportes é diretamente afetada pela economia, notadamente, o setor rodoviário que é responsável por mais de 60% da movimentação total dos produtos.

A Confederação Nacional do Transporte – CNT realiza anualmente pesquisa para avaliar a atual situação da infraestrutura rodoviária brasileira, objetivando, em termos gerais, a avaliação das características das rodovias pavimentadas que afetam, direta ou indiretamente, a segurança e o desempenho oferecidos aos usuários do sistema rodoviário nacional – em relação ao Pavimento, à Sinalização e à Geometria da Via.

Apesar da importância do modal rodoviário o último Relatório Gerencial de 2015 da CNT apontou que as condições do pavimento indicaram que 41,6 % encontraram-se com conceito “ótimo”, 9,8% “bom”, 35,4% deficiente, 10,1 % “ruim” e 3,1 % “péssimo”, ou seja, apenas 51,4 % apresentam condições de “bom” a “ótimo”. Com base nos resultados das pesquisas realizadas pela CNT de 2001 a 2015 foi desenvolvido o gráfico da Figura 1.1. Observa-se que ao longo de 14 anos as condições do pavimento de “bom” a “ótimo” melhoraram em apenas 3,7% de 2001 a 2015.

Figura 1.1 : Gráfico da evolução das condições do pavimento (Fonte: <http://www.cnt.org.br/>).

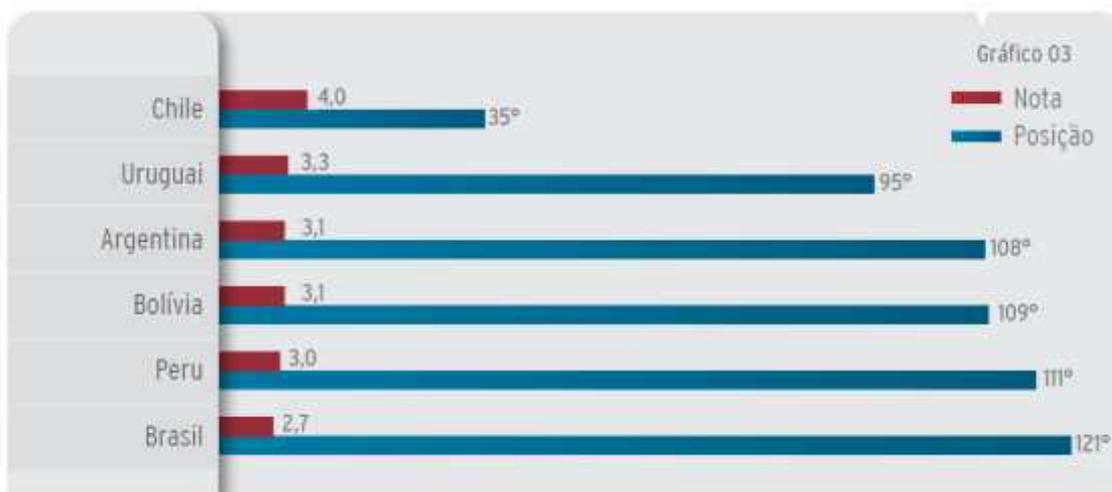


O Brasil, no que se refere à infraestrutura rodoviária, teve um ínfimo crescimento da sua malha no período de 2001 a 2015 em comparação com o crescimento da frota de veículos no mesmo período. Segundo a CNT (2015) a malha pavimentada cresceu apenas 14,7%, enquanto que a frota total de

veículos cresceu em 118,7%, o número de acidentes em rodovias federais aumentou em 77,9% e o número de mortos nessas rodovias em 47,9%.

Além do mais, o Brasil é um dos últimos países do Ranking da América Latina em qualidade de rodovias atrás de países como o Chile, Suriname, Argentina, conforme evidencia a Figura 1.2. É notória a necessidade de investimentos federais para melhorarem e requalificarem a malha rodoviária nacional, como também, a implantação de novas rodovias.

Figura 1.2 : Ranking de qualidade das rodovias dos países da América do Sul – 2014 (CNT, 2014).



Com base no exposto, demonstra-se, assim, uma pressão crescente sobre as rodovias, tanto em volume de tráfego quanto em risco de vida para os seus usuários (CNT, 2015). Além disto, o expressivo crescimento das cargas se configura, dentre outros, como responsável pela deterioração prematura de revestimentos asfálticos, demandando assim, a utilização de misturas asfálticas cada vez mais resistentes ao trincamento por fadiga e à deformação plástica ou permanente.

Devido à importância socioeconômica para o desenvolvimento sustentável do país e ao grande patrimônio público representado pelas estradas, cabe à engenharia rodoviária o grande desafio de inovar com tecnologias e formas de gerência que reduzam o custo total do transporte do país, garantindo a manutenção e o fornecimento de uma maior extensão de rodovias em boas condições para os usuários (VASCONCELOS, 2004).

Neste sentido, nos últimos anos têm-se intensificado os esforços para criar critérios e princípios comuns que propiciem aos povos do mundo inspiração e assegurem a preservação do meio ambiente. Diversas pesquisas vêm sendo realizadas, motivadas por esta temática, com desígnio no desenvolvimento de novas tecnologias que minimizem os impactos ambientais originários da ação nefasta do homem.

O Quinto Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC), divulgado no ano de 2014, apontou para um aumento médio global das temperaturas entre 0,3°C a 1,7°C até 2100. O nível do mar poderá subir entre 26 e 55 cm ao longo do século (JURAS, 2013).

A problemática do aquecimento global tem suscitado o desenvolvimento de processos construtivos mais adequados, em consonância com o desenvolvimento sustentável. Algumas técnicas inovadoras estão sendo desenvolvidas para reduzir as temperaturas de fabricação e aplicação de concreto asfáltico usinado a quente, assegurando sua qualidade e desempenho adequado. Sobretudo, em possibilitar a redução do consumo de energia, bem como, a emissão de gases poluentes na atmosfera, contribuindo assim, sobremaneira na produção das misturas asfálticas nas usinas com menor energia e propiciando a liberação ao tráfego mais rapidamente.

As pesquisas com misturas asfálticas mornas iniciaram em 1998 na Alemanha com o programa *Low Temperature Asphalt* (Asfalto de Baixa Temperatura), o qual tem como principal objetivo desenvolver e investigar métodos de produção nos quais misturas asfálticas possam ser produzidas em temperaturas mais baixas que as usualmente utilizadas (ASPHALT INSTITUTE, 2004; NETTO et. al., 2006). Segundo Netto et. al. (2006) a redução de emissões pode permitir que usinas asfálticas estejam situadas em locais onde as regulamentações de poluição do ar sejam restritas, reduzindo distâncias entre a usina e o local de aplicação. Outra vantagem potencial é que o envelhecimento oxidativo do asfalto será minimizado com temperaturas de operação inferiores. Isso pode resultar na redução de trincas causadas pelo endurecimento do ligante, ou pode melhorar a trabalhabilidade da mistura no processo de aplicação. Em adição às razões supracitadas, que estão relacionadas com os efeitos diretos que a produção de misturas asfálticas a altas temperaturas tem sobre o ambiente, misturas produzidas a baixas temperaturas permitem reduzir custos com o consumo energético (até 30%) nas usinas de asfalto (ASPHALT INSTITUTE, 2004; BARTHEL et. al., 2004).

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).

Neste contexto, os aditivos naturais (aditivos verdes), notadamente, as oleaginosas, tais como: a palma e o babaçu, no norte; a soja, o girassol e o amendoim, nas regiões do sul, sudeste e centro-oeste; a mamona que, além de ser a melhor opção do semiárido nordestino, apresenta-se também como alternativa às demais regiões do país (ver Figura 1.3); se constituem, potencialmente, como agentes viáveis para reduzir a temperatura de usinagem e compactação (TUC) ao serem incorporados ao CAP que integrará as misturas asfálticas. Igualmente, podem ser utilizados como agentes modificadores do CAP proporcionando melhorias nas propriedades mecânicas e de susceptibilidade à variação da temperatura.

Figura 1.3 : Matérias-primas mais adequadas para produção de biodiesel por região (ESTEVES & PEREIRA, 2015).



O Brasil é um grande consumidor de óleo diesel devido ao seu sistema de transportes principalmente ser apoiado no modal rodoviário. Devido a grande demanda deste derivado de petróleo, a escassez e alta do preço do petróleo, bem como as preocupações sobre as mudanças climáticas globais, a produção de biodiesel tem recebido grande atenção, sendo este obtido a partir de óleos vegetais, gorduras de origem animal ou óleos usados em frituras.

Com incentivos do Governo Federal por meio do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) e dos governos de diversos Estados e municípios, o país busca matérias-primas que possibilitem oportunidades de desenvolvimento sustentável para as diversas regiões. Outrossim, considerando que o percentual de aditivos naturais ao ser incorporado ao ligante asfáltico é muito pequeno, torna-se viável a sua utilização em misturas asfálticas.

Dentre os óleos vegetais, destacam-se o óleo de Mamona e o óleo de Linhaça, os quais vêm ganhando grande destaque, no cenário de oleaginosas, em função de serem abundantes no Nordeste brasileiro e também devido ao seu alto teor de óleo, permitindo o incentivo da agricultura familiar e o desenvolvimento da qualidade de vida no semiárido, especialmente com o cultivo desta oleaginosa em consórcio com outras culturas (Ex.: Algodão, feijão etc.) (AZEVEDO & LIMA (2001).

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 convencional e modificado 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 (SOUZA, 2012).

O óleo de Linhaça é um dos mais importantes dos óleos secantes. O poder secante desse óleo está diretamente ligado às insaturações (GALVÃO et. al., 2008), o que lhes confere a reatividade química, principalmente com o oxigênio do ar para formar uma cadeia polimérica por meio das ligações cruzadas “cross-linking” entre as cadeias de ácidos graxos de um mesmo triacilglicerol ou de diferentes (PLATER et. al., 2003).

Os óleos secativos são utilizados como médium na pintura a óleo desempenhando a função (1) executiva – permite que as cores sejam aplicadas e espalhadas; (2) aglutinante – mantém as partículas de pigmento aglutinadas na película “seca”, protegendo-as da ação atmosférica ou acidentes mecânicos; (3) adesiva – atua como adesivo, fixando as cores ao fundo e (4) óptica – realça a profundidade e tonalidade do pigmento na película “seca”. Não são todos os óleos vegetais que possuem essa propriedade secativa. Dependendo da velocidade de secagem eles podem ser classificados como semi-secativos ou não-secativos (CHURCH, 1892). Foi justamente essa propriedade adesiva que o óleo de Linhaça proporciona aos vernizes e tintas que motivou a sua utilização na modificação do CAP vislumbrando o mesmo efeito nas misturas asfálticas.

Portanto, considerando as propriedades físicas, químicas e reológicas dos óleos de Mamona e de Linhaça é possível estabelecer a hipótese de que essas oleaginosas podem servir como modificadores do CAP contribuindo nas propriedades reológicas e mecânicas das misturas asfálticas, principalmente, em termos de adesão e coesão e, assim, no avanço tecnológico dos procedimentos utilizados na pavimentação asfálticas das rodovias.

## **1.2 Hipótese**

Parte-se do pressuposto ou Hipótese de que “as oleaginosas, óleo de mamona (*Ricinus communis*) e óleo de linhaça (*Linum usitatissimum*), podem ser utilizadas como agentes modificadores do CAP e que as mesmas proporcionam melhorias nas suas propriedades mecânicas e de susceptibilidade à variação de temperatura, com conseqüente diminuição em seu envelhecimento prematuro”. Em decorrência à não rejeição desta hipótese, teríamos uma alternativa ao desenvolvimento de procedimentos e de técnicas, a fim de produzir e valorar utilizando estas oleaginosas como aditivos no uso de cimentos asfálticos de petróleo em revestimentos de pavimentos flexíveis.

Para atingir este objetivo, procurar-se-á verificar a validade da seguinte hipótese: “as oleaginosas de *Ricinus communis* e *Linum usitatissimum* podem ser utilizadas como aditivos para melhorar as propriedades reológicas e diminuir a susceptibilidade ao aumento de temperatura dos Cimentos Asfálticos de Petróleo”.

Para isso, as bases lógicas adotadas foram fundamentadas em Hempel (1981):

“A sequência lógica de raciocínio necessária à verificação e conseqüentemente aceitação de uma hipótese pode ser o método ou “caminho” a ser adotado para aceitar a partir da não rejeição de uma hipótese em questão”.

Para este trabalho foi adotado o método de inferência indutiva, frequentemente denominado de “o teste da hipótese”, isto é, a formulação de uma hipótese como tentativa de resposta a uma questão em estudo. Com isso, contrariamente ao que acontece na inferência dedutiva, se todas as premissas são verdadeiras, a conclusão é provavelmente verdadeira, mas não necessariamente verdadeira.

Para Rudio (1999) apud Arimatéia (2015) a hipótese é uma suposição que se faz na tentativa de explicar o que se desconhece. Esta suposição tem por característica o fato de ser provisória, devendo, portanto, ser testada para a verificação de sua aceitação. Neste sentido, hipótese é uma suposta resposta ao problema a ser investigado.

Do ponto de vista metodológico, a certeza acerca do método adotado encontra-se em concluir que a hipótese levantada poderá ser ou não ser rejeitada diante dos fatos observados segundo critérios preestabelecidos. Porém, nenhuma hipótese poderá ser confirmada definitivamente, a menos que a inferência seja feita em função da população e não de uma amostra que se diz representativa. Com isso, para se verificar a hipótese formulada, optou-se por refutar ou rejeitar as hipóteses antagônicas ou “nulas”. Desta maneira, em caso de rejeição das hipóteses antagônicas, traz-se para a hipótese formulada um caráter de aceitação, que serão válidas até que estudos futuros demonstrem o contrário (RODRIGUES, 1998).

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Geral**

O objetivo do presente trabalho foi estudar, em laboratório, a influência da adição dos óleos de Mamona e de Linhaça no CAP convencional e modificado por polímero SBS, avaliando os benefícios quanto à melhoria das propriedades reológicas, redução de temperatura de usinagem e compactação - TUC e mecânicas das misturas asfálticas formuladas pelos procedimentos de dosagem Marshall e Superpave.

### 1.3.2 Específicos

- Estudar as propriedades reológicas do CAP convencional (CAP 50/70) e modificado (CAP 55/75-E com SBS) com adições de 4%, 5% e 6% dos óleos de Mamona e de Linhaça;
- Analisar os ligantes convencional e modificado com SBS nas condições antes e após o envelhecimento a curto prazo mediante o procedimento RTFO;
- Obtenção do teor ótimo do ligante convencional e modificado com SBS por meio das dosagens Marshall e Superpave;
- Estudar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas a partir da realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, resistência ao dano por umidade induzida (Lottman modificado), resistência ao desgaste Cântabro, vida de fadiga e deformação permanente (Flow Number).

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Introdução**

Neste capítulo são delineadas considerações gerais acerca da composição química do cimento asfáltico de petróleo – CAP e os mecanismos de envelhecimento. Em seguida, algumas exposições sobre as misturas asfálticas mornas, em termos históricos e tecnologias utilizadas na sua produção. Na sequência, são caracterizadas as oleaginosas, especificamente, os óleos de Mamona e de Linhaça nos aspectos produtivo, químico, reológico, bem como, sua influência no ligante asfáltico. Continuamente, apresentam-se algumas pesquisas com oleaginosas. Logo depois, algumas pesquisas com auxílio do ensaio de FTIR para avaliar o CAP puro, com polímero, o óleo de Mamona e de Linhaça. Por fim, discorre-se sobre as propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo.

### **2.2 Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP**

#### **2.2.1 Composição Química**

O CAP é um dos mais antigos e versáteis materiais usados pela humanidade. Na antiguidade, por ser um material impermeável e aglutinante, foi usado por diversos povos como material cimentante, impermeabilizante e de revestimento. Hoje, o asfalto é amplamente utilizado na construção de estradas, mais precisamente, como ligante em pavimentos flexíveis (TADEU JUNIOR, 2008).

Segundo Whiteoak (1990) o cimento asfáltico é basicamente um hidrocarboneto composto por moléculas de hidrogênio e carbono. A fórmula exata do ligante asfáltico é muito variável, pois ele é um resíduo da produção do refino do petróleo cru e também depende do tipo de petróleo disponível no momento do refino. O betume como outras substâncias orgânicas é afetado pela presença de oxigênio, pela radiação ultravioleta e por variações de temperatura.

Os CAPs são materiais betuminosos, aglutinantes, de cor escura, constituídos por misturas complexas de hidrocarbonetos de elevada massa molar (em torno de 93%) cujos componentes principais são o carbono e o hidrogênio, tendo, também, em proporções muito pequenas, oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais, como o níquel, ferro e vanádio. Estes são originários do petróleo, do qual podem ser obtidos por evaporação natural de depósitos localizados na superfície da terra (asfaltos naturais), ou por destilação em unidades industriais especialmente projetadas (refinarias de petróleo). Podem ser utilizados em várias aplicações, como por exemplo, em impermeabilização de construções civis e, principalmente, em obras de pavimentação (FAWCETT e McNALLY, 2000; VLACHOVICOVA et. al., 2007 apud ALENCAR, 2009).

Segundo Morilha (2004) o CAP é um material termoplástico, semissólido à temperatura ambiente e viscoelástico. Comporta-se como um sólido vítreo a baixas temperaturas e/ou durante carregamento

rápido (pequeno tempo de aplicação de carga – alta frequência de aplicação) e como um fluido viscoso a altas temperaturas e/ou durante carregamento lento (longo tempo de aplicação de carga – baixa frequência de aplicação).

O CAP pode ser produzido de diversas maneiras, em função do tipo de petróleo. A composição química do petróleo varia bastante, especialmente, em relação aos teores de frações destiláveis, resíduo de vácuo e temperaturas de corte durante o processamento. Na composição básica do petróleo as frações representativas para o asfalto são constituídas por moléculas que possuem mais de 38 carbonos (SANTA MARIA et. al., 2002 apud ALENCAR, 2009).

O CAP é composto basicamente por duas frações: os maltenos, que apresentam baixa polaridade e são constituídos pelos compostos saturados, aromáticos e resinas; e os asfaltenos, que constituem a fração mais pesada e polar. Os compostos saturados influenciam negativamente a susceptibilidade térmica; os aromáticos contribuem para a melhoria das propriedades físicas do ligante; as resinas melhoram a ductibilidade; e os asfaltenos contribuem para o aumento da viscosidade, tornando os asfaltos menos susceptíveis às variações de temperatura (MORALES et. al., 2004 apud BRINGEL, 2007).

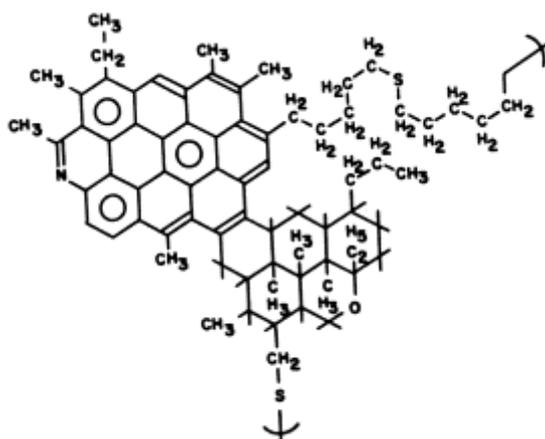
Corbett (1969) desenvolveu um método de separação das frações do asfalto, notadamente, constituída por 4 (quatro) grupos químicos: saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos, conhecidos como frações SARA. Saturados, aromáticos e resinas constituem a fração maltênica, que possui baixa massa molar e polaridade e é solúvel em n-heptano. Na Figura 2.1 consta o esquema de separação química das frações do CAP conforme idealizou o autor supracitado. Não obstante, a composição química dos asfaltos não pode ser definida com exatidão, por ser extremamente complexa e variável, dependendo do tipo do petróleo do qual se extrai o asfalto e de modificações decorrentes de tratamentos durante o refino ou durante sua vida de serviço (PAMPLONA, 2013).

Figura 2.1 : Layout de separação química do ligante (CORBETT, 1969).



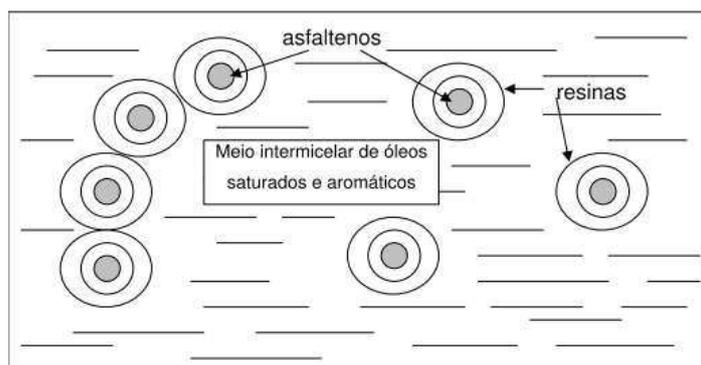
Segundo Silva (2005 a), a variação na proporção entre as frações químicas do ligante asfáltico origina asfaltos com diferentes composições químicas e estruturação. A estruturação ou organização das frações químicas SARA foram estudadas por meio da elaboração de alguns modelos. O modelo mais conhecido e utilizado é o de Yen (1961) que analisou moléculas de asfalto através de difração de raios X. Yen e colaboradores mostraram que os planos de anéis aromáticos, apresentados na Figura 2.2, são ligados por ligações de hidrogênio ou pontes de S e O, formando “pilhas” de 3 a 5 planos (ou folhas). Estas partículas, que possuem um raio de 8,5 a 15 Angstroms e espessura de 16 a 20 Angstroms, se associam em partículas coloidais, seja sob a forma de micelas, seja sob a forma de aglomerados de micelas. Assim, Yen definiu um arranjo tridimensional para o ligante asfáltico.

Figura 2.2 : Estrutura hipotética de asfaltenos (ZANZOTTO, 2001).



As resinas funcionam como agentes peptizadores, as quais se adsorvem nas moléculas de asfaltenos a fim de permitir a dispersão destas no meio de óleos saturados e aromáticos. Sendo assim, o ligante asfáltico é definido como um meio coloidal complexo no qual moléculas isoladas constituem a fase contínua e as micelas, e os aglomerados de micelas, constituem a fase dispersa, criando-se assim um equilíbrio: moléculas  $\Leftrightarrow$  micelas  $\Leftrightarrow$  aglomerados. A Figura 2.3 mostra o modelo de Yen para a estrutura coloidal do ligante asfáltico (SILVA, 2005 a).

Figura 2.3 : Apresentação do modelo de estrutura coloidal segundo Yen (SILVA, 2005 a).



O equilíbrio deste sistema está intimamente relacionado com as propriedades físicas e reológicas do ligante asfáltico, além de ser extremamente importante na previsão da estabilidade coloidal do asfalto e de sua compatibilidade com aditivos (SILVA, 2005 a).

Segundo Castro (2003) concernente aos constituintes SARA os asfaltenos são hidrocarbonetos que apresentam peso molecular elevado contendo maior teor de heteroátomos (N, S, O, V, Ni, Fe), apresentando-se, quando isolado, na forma sólida, quebradiça, preta, de alta viscosidade e quimicamente semelhante às resinas.

A característica de diferenciação significativa da fração asfáltica é a preponderância de moléculas planar altamente condensadas e sistemas de anéis aromáticos polarizáveis em conjunto com uma elevada concentração de grupos funcionais polares, contendo heteroátomos (PETERSEN, 1984). Os saturados correspondem a aproximadamente 5 a 15% do CAP. São óleos viscosos apolares com peso molecular semelhante a gama de aromáticos (WU, 2009). Segundo Lesueur (2009), os saturados formam um líquido incolor ou de pouca coloração em temperatura ambiente, em função da temperatura de transição vítrea muito baixa ( $-70^{\circ}\text{C}$ ).

As resinas são solúveis em n-heptano e é quimicamente semelhante aos asfaltenos constituindo uma expressiva fração do CAP (30 a 45%). São escuros sólido ou semissólido de natureza polar e fortemente adesiva. As resinas são consideradas como agentes de dispersão para asfaltenos. Assim, a proporção de resinas pode determinar, até certo ponto, a solução (sol) ou caráter gelatinoso (GEL) do CAP (WHITEOAK, 2003; PAMPLONA, 2013).

Os aromáticos são os constituintes, juntamente com as resinas, mais abundantes no CAP, uma vez que a sua quantidade varia de 30 a 45%. Essa fração forma um líquido de cor amarelada a avermelhada na temperatura ambiente. Os aromáticos são mais viscosos que os saturados, na temperatura ambiente, devido à alta temperatura de transição vítrea (aproximadamente  $-20^{\circ}$ ) (PAMPLONA, 2013).

Segundo Whiteoak (1991), sucintamente, os componentes do CAP possuem as seguintes propriedades:

- saturados – têm influência negativa na suscetibilidade térmica. Em maior concentração amolecem o produto;
- aromáticos – agem como plastificantes, contribuindo para a melhoria de suas propriedades físicas;
- resinas – têm influência negativa na suscetibilidade térmica, mas contribuem na melhoria da ductilidade e dispersão dos asfaltenos;

- asfaltenos – contribuem para a melhoria da suscetibilidade térmica e aumento da viscosidade.

A quantidade das frações dos ligantes asfálticos varia de acordo com a fonte do petróleo de base e com o processamento do ligante asfáltico. Shulga et. al. (2012) avaliaram a composição química dos ligantes asfálticos de diferentes fontes do mundo (China, Venezuela, Canadá e Rússia) por meio do método SARA e observaram que as frações de saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos variam significativamente para cada ligante asfáltico, conforme Figura 2.4. Ainda, constata-se também que há uma variação na composição química do ligante asfáltico provocada pelo envelhecimento (Figura 2.5) (SHULGA et. al., 2012).

Figura 2.4 : Influência da origem na composição química (SHULGA et. al., 2012).

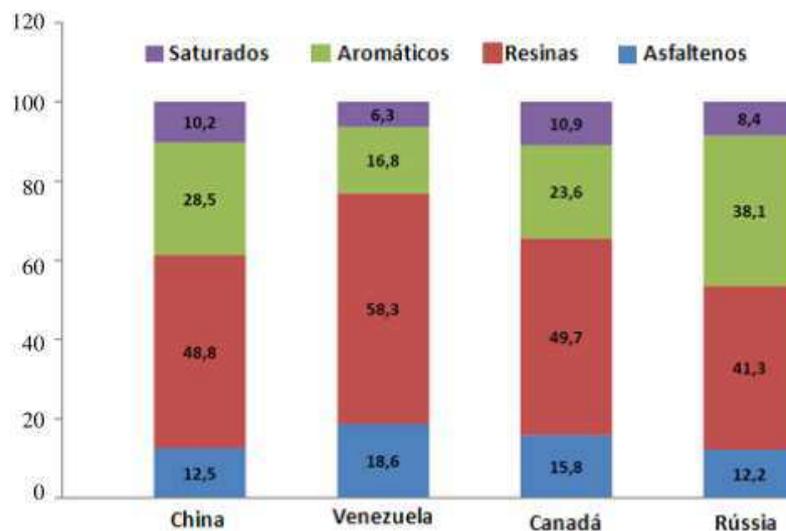
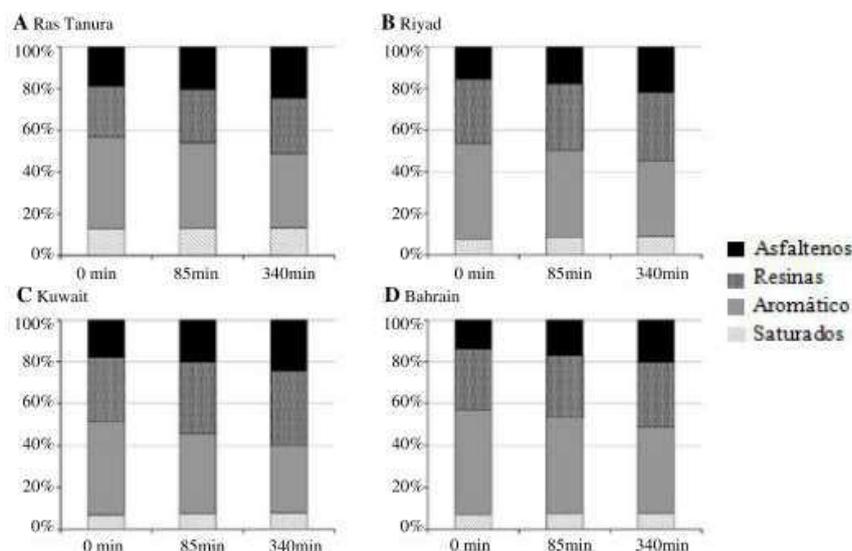
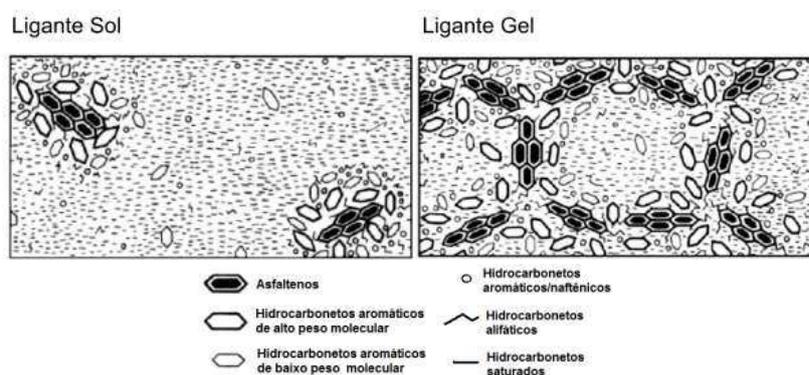


Figura 2.5 : Fração SARA para vários CAPS antes e após 80 min e 340 min de envelhecimento no RTFO adaptado de (LESUEUR, 2009).



O CAP é universalmente considerado um sistema coloidal de micelas de asfaltenos, peptizados por resinas dispersas num meio de compostos parafínicos e aromáticos (LEUSEUR et. al., 1996; RUAN et. al., 2003; POLACCO et. al., 2006). Um modelo coloidal foi desenvolvido por Pfeiffer & Saal (1940) para explicar as diferenças obtidas nas medidas de propriedades reológicas, e dependendo do estado de agregação do meio coloidal, este pode ser encontrado no estado SOL ou GEL, ou até mesmo SOL-GEL, como ilustrado na Figura 2.6 (ALENCAR, 2009).

Figura 2.6 : Modelo coloidal original: ligante sol e gel adaptado de (MOTHÉ, 2009).



Em termos estruturais, na presença de micelas de asfaltenos totalmente dispersas e não ocorrendo interação entre elas, devido à quantidade suficiente de agentes peptizantes, os ligantes asfálticos são considerados do tipo SOL. Os CAPs do tipo SOL exibem características de um fluido Newtoniano e apresentam alta susceptibilidade a temperatura, alta ductibilidade e um ponto de amolecimento baixo. Por isso, são chamados de CAPs “moles”. Enquanto o CAP do tipo GEL exibe um comportamento de fluido não Newtoniano, além de apresentar uma baixa susceptibilidade térmica e um ponto de amolecimento mais alto. São chamados de CAPs “duros” e o seu fluxo é dificultado pela presença de micelas de asfaltenos interligadas (LUCENA, 2005). Em geral, a maioria dos CAPs exibem um comportamento intermediário, devido a uma mistura de estruturas SOL-GEL (LEUSEUR, 2009 apud PAMPLONA, 2013).

Segundo Nciri et. al. (2013), determina-se a Instabilidade Coloidal -  $I_c$  com base no modelo coloidal descrito primeiro por Nellensteyn (1924) e, em seguida, por Pfeiffer & Saal (1940) para explicar a diferença entre "sol" e "gel". Entre esses dois extremos, a maioria dos asfaltos exibem um comportamento intermediário devido a uma estrutura mista "sol-gel". Para diferenciar esses vários tipos de CAP, o índice  $I_c$  foi introduzido por Gaestel et. al. (1971) sendo calculado conforme a Equação 2.1.

$$I_c = \frac{\% \text{ Saturados} + \% \text{ Asfaltenos}}{\% \text{ Resinas} + \% \text{ Aromáticos}} \quad \text{Equação 2.1}$$

Os CAPs com  $I_c$  inferior a 0,1 são poucos estruturados, cujo comportamento pode ser chamado de SOL. Valores de  $I_c$  superiores a 0,5 representam um CAP bastante estruturado, com comportamento de GEL.

Valores intermediários, entre 0,1 e 0,5, representam um ligante asfáltico SOL-GEL, ou seja, com comportamento intermediário. Ainda, considera-se também que quanto maior for  $I_c$ , maior será a instabilidade coloidal do asfalto e mais difícil à incorporação de um modificador, como polímero (GLITA, 1988 apud SILVA, 2005 a).

Segundo alguns pesquisadores do programa SHRP o modelo proposto por Yen não elucida o comportamento reológico do CAP no tocante a temperatura, envelhecimento e desempenho em serviço. Ainda, não considera válido o conceito de asfaltenos e maltenos, classificando as frações asfálticas em polares e apolares. O modelo SHRP propõe que as forças intra e intermoleculares são responsáveis pela formação de redes tridimensionais que resultam em características elásticas e viscosas. Com o aumento da temperatura, ou ação de forças cisalhantes, ocorre destruição destas interações e consequente redução da elasticidade e aumento de suas características viscosas (ANDERSON et. Al., 1991; ANDERSON & CHRISTENSEN, 1992; JONES, 1992, BAHIA et. al., 2001 apud SILVA, 2005 a). Na Tabela 2.1 constam as interações e os compostos envolvidos propostos pelo SHRP.

Tabela 2.1 : Proposição do SHRP para as interações existentes entre as frações asfálticas e seus compostos relacionados.

FORÇAS INTRA E INTERMOLECULARES	COMPOSTOS
Van der Waals	Longas cadeias alifáticas
Pontes de Hidrogênio	Polares/heteroátomos
Atrações $\pi - \pi$	Aromáticos

No entanto, apesar das proposições do SHRP, o modelo de Yen e o índice de instabilidade coloidal continuam sendo amplamente utilizados por vários autores segundo Silva (2005 a), principalmente na previsão da compatibilidade do ligante asfáltico com agentes modificadores.

## 2.2.2 Envelhecimento

Um dos fatores que influencia o desempenho e as características físicas, químicas e reológicas do ligante asfáltico é o fenômeno conhecido como envelhecimento. Fatores como: oxidação, volatilização, polimerização e tixotropia, assim como, os efeitos da luz, água e reações químicas com os agregados contribuem para este processo. O envelhecimento ocorre durante as etapas de estocagem, usinagem, transporte, manuseio, aplicação e vida de serviço do ligante, acarretando aumento da sua consistência e tornando-o mais quebradiço, menos dúctil e, dessa forma, favorecendo o aumento da viscosidade (MORILHA, 2004; ZEGARRA,2007).

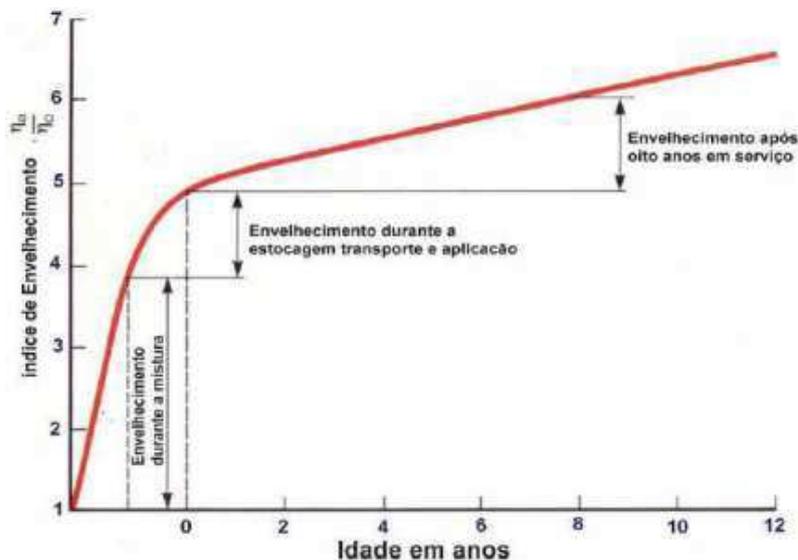
O processo de envelhecimento do asfalto ocorre desde sua fabricação na refinaria até seu último dia de vida em uma rodovia. O envelhecimento do ligante asfáltico altera suas propriedades físicas, químicas e reológicas e causa um aumento na sua consistência, provocando, um aumento da rigidez da mistura asfáltica. Assim esta fica mais suscetível à fissuração e desagregação, desta forma, a mistura asfáltica apresenta uma menor durabilidade (MELLO, 2014).

O endurecimento por oxidação é considerado como a principal causa do envelhecimento dos asfaltos, embora o envelhecimento devido à evaporação dos componentes mais voláteis dos betumes possa ser também bastante significativo. O primeiro envelhecimento do CAP se dá ainda durante a usinagem, em que os agregados aquecidos são misturados com o cimento asfáltico aumentando a sua viscosidade e diminuindo a penetração, devido à oxidação pelo contato com o ar, é à perda de voláteis (ROBERTS et. al., 1996). O envelhecimento prossegue durante as fases de estocagem, aplicação e compactação da mistura asfáltica na pista, embora com menos intensidade. Depois disso o envelhecimento se processa lentamente ao longo da vida útil do revestimento, até que este adquira uma rigidez excessiva, que facilita o trincamento por fadiga.

Segundo Sobreiro (2014) existem muitos mecanismos envolvidos no envelhecimento dos ligantes asfálticos, porém dois são mais relevantes: a perda de componentes voláteis (saturados e aromáticos) e a reação química do asfalto com o oxigênio do ar. O material avaliado pode apresentar tanto ganho quanto perda de massa, indicado com sinal positivo ou negativo, respectivamente. Materiais com baixos teores de componentes leves apresentam ganho de massa, porém materiais com altos teores de voláteis geralmente apresentam perda de massa. Isso se deve ao fato que, os componentes leves dos materiais volatilizam, proporcionando perda de massa (evaporação), enquanto a reação entre o oxigênio e o material causa ganho de massa (oxidação).

O processo de envelhecimento do CAP pode ser dividido em três etapas: a primeira etapa, durante o processo de usinagem e representa  $\pm 60\%$  do envelhecimento total sofrido pelo ligante; a segunda etapa, durante a estocagem, o transporte, o espalhamento e a compactação, representando aproximadamente 20% do envelhecimento total sofrido pelo ligante; e na terceira etapa, o envelhecimento ocorre durante a vida útil do revestimento devido à ação do meio ambiente e representa  $\pm 20\%$  do envelhecimento total do ligante (WHITEOAK, 1990 apud ARAUJO, 2007). Neste sentido, para ilustrar o envelhecimento relativo às três etapas retromencionadas, na Figura 2.7 o índice de envelhecimento do CAP é dado pela razão  $\eta_a/\eta_o$ , onde  $\eta_a$  é a viscosidade em uma dada condição de envelhecimento e  $\eta_o$  é a viscosidade inicial do ligante asfáltico.

Figura 2.7 : Envelhecimento do ligante asfáltico nas etapas de construção e de utilização do pavimento. Adaptado de (WHITEOAK, 1991).



Segundo Leite et. al. (2010), no processo de usinagem e aplicação ocorre o endurecimento do CAP de forma mais significativa em razão da perda de voláteis e oxidação superficial. Os autores Read & Whiteoak (2003 apud MELLO, 2014) afirmam que uma forma de minimizar esse efeito é por meio do controle de temperatura de usinagem, pela adequada espessura da película de ligante envolvendo os agregados, correspondente a um teor ótimo de ligante, e ainda pelo adequado teor de vazios, sendo este também um fator importante.

No processo de envelhecimento ocorre a diminuição do teor de aromáticos que se transformam em resina e, em seguida, parte se transforma em asfaltenos, ocasionando um aumento desses constituintes e uma pequena variação ou nenhuma de saturados em função da sua baixa reatividade química, conforme evidencia a Figura 2.5 (TONIAL, 2004; SOBREIRO, 2014).

Os fatores principais que podem alterar a composição química do CAP são a exposição ao oxigênio, à radiação ultravioleta e às variações de temperaturas (MELLO, 2014). Segundo Whiteoak (1991), existem quatro mecanismos principais que explicam o endurecimento ou envelhecimento do asfalto a seguir descrito:

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

- perda de voláteis: parâmetro importante relacionado ao material volátil do ligante;
- endurecimento físico: ocorre à temperatura ambiente e é atribuído à reordenação de moléculas e à cristalização de parafinas. Trata-se de um fenômeno reversível;
- endurecimento exsudativo: resulta da migração de componentes oleosos do ligante para o agregado mineral.

O CAP pode ter sua composição química diferente devido a vários fatores, porém suas características reológicas podem ser semelhantes, como por exemplo, as medidas nos ensaios de viscosidade, penetração e outros. Por isso, MIRZA & WITCZAK (1995) relatam o que afeta mais o envelhecimento do ligante é sua composição inicial. Um exemplo se refere ao teor de asfalto presente no CAP: se houver o excesso de asfalto na estrutura (mais de 30%) ocorre a perda de elasticidade e o asfalto se torna frágil. Se o oposto ocorrer, ou seja, menos de 20% na estrutura, ocorre uma elevada suscetibilidade térmica e uma deformação plástica excessiva (PIZZORNO, 2010 apud MELLO, 2014).

Enquanto o mecanismo de envelhecimento do ligante e da mistura é complexo, seu impacto sobre o desempenho do pavimento é geralmente compreendido. Como o ligante asfáltico envelhece, isto resulta em um aumento da rigidez deste ligante e, conseqüentemente, da mistura asfáltica. Este efeito tende a aumentar a resistência à formação das trilhas de roda da mistura e pode ser considerado como um efeito benéfico do envelhecimento. Em contrapartida, o envelhecimento pode resultar no desenvolvimento e/ou aceleração de vários tipos de problemas, tais como trincamento e fratura por fadiga, trinca térmica e deterioração devido ao desgaste e à umidade, esforços que podem levar à falência da estrutura do pavimento (BELL, WIEDER & FELLIN, 1994; MIRZA & WITCZAK, 1995; MORILHA 2004).

Muitas pesquisas foram realizadas com o intuito de produzir revestimentos asfálticos mais duráveis. Visando atender a esses requisitos foram desenvolvidos muitos modificadores, dentre estes, citam-se os polímeros e a borracha moída de pneus. Os polímeros mais utilizados na modificação dos asfaltos são SBS (estireno-butadieno-estireno), EVA (polietileno-vinil-acetano) e SBR (estireno-butadieno-rubber).

A modificação dos ligantes asfálticos pela adição de polímeros permite que, por meio da inclusão de pequenas quantidades ao ligante original, possam ser alcançadas algumas características diferenciadas e fundamentais (adaptação do DNIT (1998) E ASPHALT ACADEMY (2001)). A resistência ao envelhecimento é maior, tanto no laboratório como em campo, do que a dos ligantes tradicionais. A maior viscosidade do ligante modificado incrementa a espessura de película sobre o agregado, protegendo o revestimento do envelhecimento acelerado. Uma das principais vantagens dos ligantes modificados por borracha moída de pneu é que a sua relação temperatura viscosidade não é linear. Ele é mais viscoso do que o ligante tradicional, entretanto não perde a ductilidade e quando sujeito a altas temperaturas não reduz tanto a sua consistência quanto os ligantes convencionais. (SPECHT & CERATTI, 2003)

Para quantificar o envelhecimento dos ligantes asfálticos brasileiros existem ensaios normatizados. A especificação para o ensaio ECA – Efeito do Calor e do Ar – perda por aquecimento normalizado no método da ABNT MB 425 e ASTM D 1754. Têm-se também os ensaios de envelhecimento prescritos pelo SUPERPAVE (Superior Performance Asphalt Pavements) do programa SHRP: o ensaio RTFOT (rolling thin film oven test), método ASTM D 2872 e também normalizado pela AASHTO (T-240) e o ensaio PAV (pressure aging vessel), método ASTM D 6521.

### 2.3 Misturas Asfálticas Mornas

As expressões asfalto morno ou mistura morna têm sido usadas no Brasil para representar a sigla WMA (Warm Mix Asphalt) que agrupa uma série de tecnologias que permite a redução da temperatura na qual as misturas asfálticas são produzidas e aplicadas. Estas tecnologias possibilitam a diminuição da viscosidade ou da tensão superficial do asfalto em temperaturas de 20°C a 55°C mais baixas que a temperatura das misturas quentes. Assim, há melhoria na trabalhabilidade e na compactação, há redução da permeabilidade e do endurecimento do ligante, que é responsável pelo melhor desempenho em termos de trincas e susceptibilidade da mistura (CAVALCANTI, 2010).

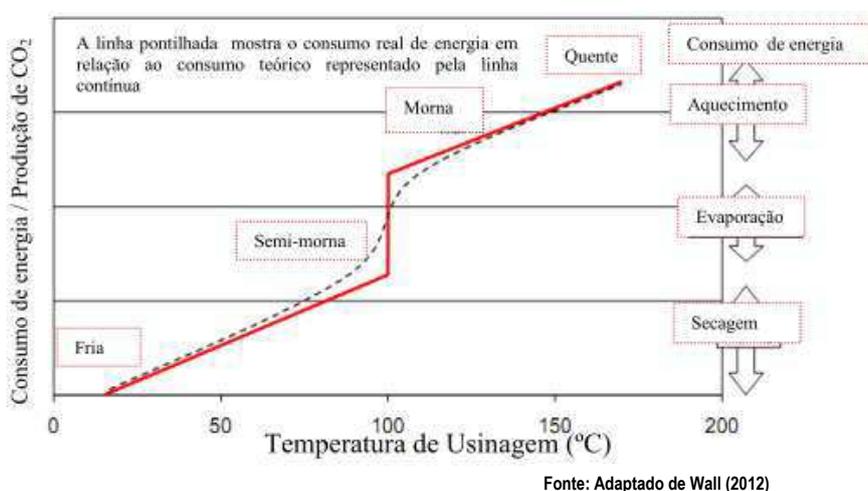
Os diferentes tipos de misturas asfálticas de usina podem ser classificados de acordo com a temperatura empregada em sua produção, podendo ser divididos basicamente em quatro grupos: misturas a quente, misturas mornas, misturas semimornas e misturas a frio (MOTTA, 2011). As misturas a quente são aquelas em que a temperatura de usinagem varia entre 150°C e 180°C, dependendo especialmente do tipo de ligante usado. As misturas a frio são produzidas à temperatura ambiente onde a emulsão utilizada e os agregados não passam pelo processo de aquecimento. Entre a temperatura de produção de misturas a quente e a temperatura utilizada nas misturas a frio são produzidas as misturas mornas e semimornas. A diferença entre estas duas misturas é que esta última é produzida a temperatura menor ou igual a 100°C (PROWELL & HURLEY, 2007 apud NELSON FILHO, 2013). Na Figura 2.8 consta ilustração esquemática das misturas de acordo com a temperatura de produção.

Figura 2.8 : Esquema de classificação das misturas asfálticas com a temperatura de usinagem adaptado de (FHWA, 2008).



Nelson Filho (2013) apresenta o consumo de energia e emissão de gases (Figura 2.9), a diferença entre a Figura 2.9 e a Figura 2.8 se refere à energia consumida na transição da mistura semimorna para a morna. A queda no consumo de combustível na transição citada (linha pontilhada) é menos abrupta do que aquele apresentado pela linha sólida. Ainda, o referido autor relata que Wall (2012) não apresentou dados referentes à redução na emissão de CO<sub>2</sub>, apenas inferiu que a redução da energia resulta também em diminuição de gás carbônico e cita que pesquisas realizadas pela Associação Europeia de Pavimentação (EAPA) mostram que a diminuição de 10°C na temperatura de produção das misturas pode cortar a emissão de aerossóis pela metade.

Figura 2.9 : Consumo de energia e de emissão de gases durante a produção de misturas Asfálticas (NELSON FILHO, 2013).



Conforme relata Otto (2009) apud Larry Junior (2014), um dos princípios tecnológicos das misturas asfálticas mornas é baseado na redução da viscosidade dos ligantes betuminosos dentro de determinados limites de temperatura, permitindo desta forma o total encobrimento do agregado em temperaturas abaixo daquelas que tradicionalmente seriam necessárias para a produção de concreto asfáltico e este fator também contribui, de alguma forma, para o processo de compactação.

Segundo D'Angelo et. al. (2007) apud Larry Junior (2014), alguns dos principais benefícios resultantes da utilização das misturas mornas que impulsionaram o seu crescimento são:

- melhor compactação no campo de modo que pode permitir a possibilidade de trabalhos em distâncias mais longas e, estendendo este poder de transporte a maiores distâncias, pode tornar o WMA mais econômico;
- aspectos ambientais e de desenvolvimento sustentável, especialmente com a redução do consumo de energia que resulta na redução das emissões de CO<sub>2</sub>. A redução dos recursos naturais (combustível) e da produção de CO<sub>2</sub> é um fator fundamental para que o

desenvolvimento sustentável seja alcançado. Ressalta-se que na Europa esta redução é obrigatória depois da adesão e da ratificação da União Europeia ao Protocolo de Kyoto;

- bem estar dos trabalhadores, sobretudo em comparação ao CBUQ e outras misturas que são produzidas em temperaturas superiores. Os empreiteiros têm percebido que as temperaturas reduzidas melhoram o conforto dos trabalhadores e a sua produtividade;

Ainda, Larry Junior (2014) acrescenta que durante a execução também são observados os seguintes benefícios:

- capacidade de ser executado em temperaturas mais frias e ainda obter densidade;
- capacidade de ser transportado a maiores distâncias e ainda ter trabalhabilidade e potencial de compactação;
- capacidade da mistura ser compactada com menos esforço em condições normais, sem muito frio e não a distâncias muito longas;
- capacidade de incorporar maiores porcentagens de RAP.

Normalmente, o emprego de elevadas temperaturas na usinagem e compactação de misturas asfálticas a quente tem dois objetivos: i) retirar a água contida nos agregados antes da usinagem, uma vez que a remanescente nos agregados pode ficar “aprisionada” quando o ligante os recobre e, assim, criar uma área com potencial para haver descolamento entre o filme asfáltico e o material pétreo (efeito stripping), podendo causar desagregação do pavimento; ii) reduzir a viscosidade do ligante para sua melhor trabalhabilidade, devendo a viscosidade do asfalto ser tal que este possa ser bombeado em usina e possa recobrir os agregados de maneira adequada (BERNUCCI et. al., 2010).

Segundo Nelson Filho (2013), as misturas mornas atualmente apresentam três tecnologias distintas:

- I. empregar aditivos químicos que melhoram o recobrimento e a adesividade na mistura asfáltica;
- II. empregar aditivos orgânicos (ceras parafínicas) que alteram a viscosidade do asfalto;
- III. produzir uma espuma com o asfalto aquecido pela inserção de água e/ou aditivos com água em sua composição. De maneira geral, a redução de temperatura na usinagem de misturas mornas é realizada através da diminuição da temperatura dos agregados, mantendo-se a temperatura usual do ligante asfáltico.

### 2.3.1 Histórico

No ano de 1956 que o Dr. Ladis H. Csanyi, então professor da Iowa State University, desenvolveu estudos acerca do potencial das misturas espumadas para serem usadas como pasta selante. A partir de então, a tecnologia de asfaltos espumados, que possibilitam a diminuição das temperaturas de misturas, são usadas com sucesso em muitos países. O processo original consiste em injetar vapor de água nas misturas quentes. No ano de 1968 a Mobil Oil Austrália adquiriu as patentes da invenção do Dr. Ladis e modificou o processo original por adicionar água fria no lugar de água em forma de vapor.

Adicionalmente são relacionadas algumas pesquisas com misturas asfálticas mornas realizadas por pesquisadores nacionais e internacionais, não tendo por intuito contemplar todos os estudos atinentes ao tema em questão.

Sendo assim, buscou-se complementar o histórico elencado na pesquisa de Nelson Filho (2013), na qual constam alguns dos principais acontecimentos relacionados ao tema, a seguir delineados:

- 1956 – O professor Csanyi, da Universidade do Iowa, avalia o potencial da espuma de betume, formada por meio da introdução de vapor de água no betume quente e que poderia ser utilizada como um ligante para solos (CHOWDHURY e BUTTON, 2008);
- 1968 – A empresa Mobil Oil na Austrália, detentora da patente da descoberta de Csanyi, passa a injetar água fria no lugar do vapor d'água dando uma agilidade maior ao processo de produção do betume-espuma (KRISTJANSDOTTIR et. al., 2007);
- 1979 e 1981 – A Federal Highway Administration (FHWA) e a Asphalt Emulsion Manufacturers Association (AEMA) publicam manuais sobre o assunto (CHOWDHURY e BUTTON, 2008);
- 1995 – A empresa Shell patenteia uma técnica que utiliza dois componentes, a qual resultaria anos mais tarde no desenvolvimento da tecnologia WAM-Foam (HARRISON e CHRISTODULAKI, 2000 apud CHOWDHURY e BUTTON, 2008);
- 1995 – Na Alemanha são executadas as primeiras rodovias com revestimento composto por mistura morna, por meio da adição de Aspha-Min®, um zeólito sintético. Posteriormente esta tecnologia é aplicada também na Noruega e na Dinamarca (PROWELL e HURLEY, 2007);
- 1996 – A União Europeia inicia estudos no sentido de buscar formas para o cumprimento das metas estabelecidas pelo Protocolo de Kyoto e o Ministério do

Trabalho e das Relações Sociais alemães determina limites de exposição para os trabalhadores expostos a fumos de asfalto (MOTTA, 2011);

- 1997 – Tem início a comercialização do aditivo Sasobit® na Europa, pela empresa Sasol Wax International AG (CHOWDHURY e BUTTON, 2008). Um programa denominado Low Temperature Asphalt é iniciado na Alemanha com a missão de investigar métodos para produção de misturas asfálticas com temperaturas mais baixas que aquelas produzidas a temperaturas convencionais a quente (BARTHEL et. al., 2004);
- 1999 – Jenkins et. al. (1999) verificam os benefícios do aquecimento do agregado a temperaturas abaixo de 100°C, antes da aplicação da espuma de asfalto. De acordo com os pesquisadores, o pré-aquecimento dos agregados eleva o recobrimento, a coesão da mistura, a resistência à tração e à compactação. Ainda de acordo com estes pesquisadores, isto pode ser especialmente benéfico para aquelas misturas contendo agregados reciclados (CHOWDHURY e BUTTON, 2008);
- 2000 – Em uma Conferência Internacional de Pavimentos Asfálticos em Sidney, Austrália, o processo de produção das misturas mornas é apresentado por Harrison e Christodulaki (OTTO, 2009). Ainda neste ano, o desempenho da mistura morna é avaliado por meio de testes laboratoriais e em campo na Noruega, no Reino Unido e na Holanda, resultando em um artigo elaborado por Koenders et. al.(2000);
- 2006 – Um dos primeiros trabalhos a respeito de misturas mornas é publicado no Brasil por Souza Filho (2006), a dissertação de Mestrado deste autor na Universidade Federal do Ceará (UFC), tendo como título “Produção de Misturas Asfálticas Mornas pela Inserção de Zeólitas”;
- 2007 – Os Estados Unidos enviam à Europa uma equipe de especialistas para avaliação da tecnologia de Misturas Mornas já há algum tempo utilizada naquele continente;
- Entre estes especialistas, representantes da AASHTO e da FHWA se fizeram presentes. Ceratti et. al. (2007) elaboram uma pesquisa a nível laboratorial sobre a redução das temperaturas de produção e compactação em misturas que sofrem a inserção de água no agregado miúdo;
- 2009 – Otto (2009) realiza estudo para verificar a fadiga e o módulo complexo em misturas asfálticas mornas;

- 2010 – Um estudo com diversos aditivos em misturas asfálticas, inclusive àqueles que possibilitam a redução de temperatura de produção e compactação é realizado por Cavalcanti (2010), que avaliou o efeito destes aditivos na vida de fadiga e na resistência à deformação permanente das misturas asfálticas;
- 2011 – O relatório NCHRP 691 (2011) com o objetivo de apresentar métodos e procedimentos a serem utilizados em misturas mornas é concluído. Com base neste relatório novas pesquisas estão sendo realizadas, de modo a difundir a utilização da redução de temperaturas na produção de misturas asfálticas;
- Penz (2010) estudou propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas com adição de zeólitas sintetizadas;
- Motta (2011) elabora um estudo visando avaliar a diminuição do consumo energético e da emissão de poluentes gerados pela mistura morna em comparação com as misturas produzidas a temperaturas convencionais (elevadas);
- Budny (2012) realizou estudo para avaliar o comportamento mecânico das misturas mornas;
- Mello (2012) estudou o comportamento da adição de Evotherm nas misturas asfálticas em laboratório e em campo;
- Souza (2012) estudou a influência das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com cimento asfáltico de petróleo modificado com o óleo de Mamona;
- Nelson Filho (2013) realizou pesquisa acerca da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas mornas;
- Pérez (2013) estudou o desempenho mecânico e reológico de misturas asfálticas mornas;
- Larry Junior (2014) realizou pesquisa acerca do comportamento de misturas mornas com o emprego de simulador de tráfego;
- Merighi (2015) realizou estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu.

## 2.4 Óleo de Mamona

A mamona (*Ricinus Communis* L.), pertencente à família das Euphorbiáceas, também é conhecida vulgarmente no Brasil como palma-christi, palma-de-cristo, mamoneira, carrapateira, rícino, bafureira ou figueira do inferno. Esta xerófila de origem afro-asiática é bastante resistente à escassez de água e não suporta excesso de umidade, tanto no solo quanto no ar (ETENE, 2004 apud FARIAS, 2006).

O óleo de mamona é um óleo vegetal, conhecido como óleo de rícino e, internacionalmente, como castor oil; diferencia-se dos demais óleos vegetais pela grande quantidade de hidróxidos que contém especialmente o do ácido ricinoléico.

Segundo Savy Filho et. al., (1999), a presença desse triglicerídeo na sua composição, é de 90%, em média, contendo três grupos altamente reativos, que permitem obter-se grandes números de reações químicas decorrentes da presença do grupo carboxila no carbono 1, uma dupla ligação no carbono 9 e a hidroxila no carbono 12 que, juntas, permitem qualidades específicas à produção de uma infinidade de produtos industriais conforme a molécula ilustrada na Figura 2.10.

Embora impróprio para consumo humano, sua importância se concentra na ampla aplicação industrial como matéria-prima usada para a fabricação de uma gama de produtos, tais como ceras, lubrificantes, cosméticos, plásticos, fios, tubos, etc. (CHIERICE e CLARO NETO, 2001 apud COSTA, 2006).

O grupo hidroxila confere, a esse composto, estabilidade e alta viscosidade, que é permitida em largas faixas de temperatura, explicada pela formação de pontes de hidrogênio intermoleculares (MULLER, 1978); além de solidificarem em baixas temperaturas, possuem também estabilidade oxidativa. O grupo hidroxila também lhe confere propriedade exclusiva de solubilidade em álcool (WEISS, 1983).

Segundo Beltrão (2003) apud Costa (2016) é o único glicerídeo feito pela natureza, solúvel em álcool; trata-se, portanto, de um dos mais densos e mais viscosos de todos os óleos vegetais e animais, tendo viscosidade dez vezes maior que o óleo de girassol e outros óleos vegetais, conforme a constante na Tabela 2.2.

Figura 2.10: Derivados do ácido ricinoléico: hidroxila, carboxila e dupla ligação.

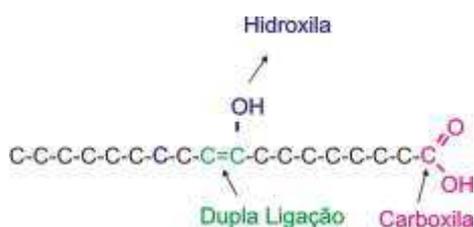


Tabela 2.2 : Viscosidade de óleos vegetais, em função da temperatura (COSTA, 2006).

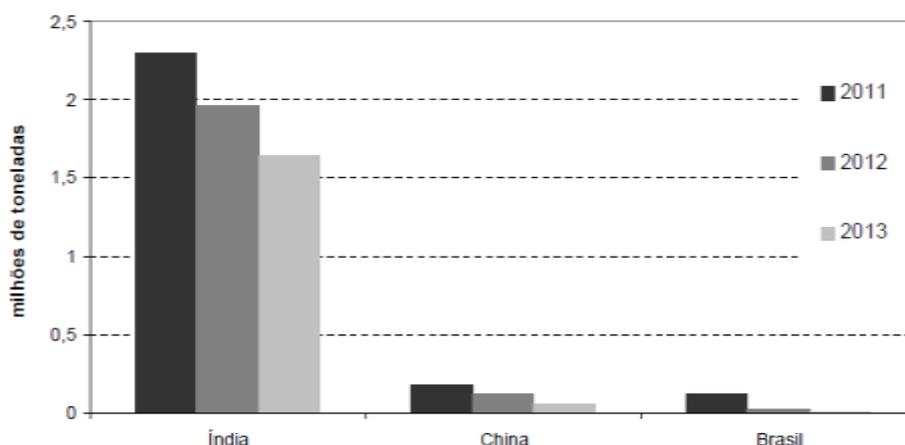
Óleo	Viscosidade (cSt)			
	37,8 °C	50,0 °C	60,0 °C	70,0 °C
Macaúba (polpa)	50,0	30,0	20,2	14,7
Pinhão manso	31,5	19,8	14,0	10,5
Índia - rasterio - polpa	45,0	27,8	19,2	14,3
Índia - rasterio - amêndoa	31,0	19,8	14,0	10,5
Piqui - polpa	47,0	28,2	19,8	14,0
Piqui - amêndoa	40,0	24,8	17,5	13,0
Tinqui	41,0	25,0	17,5	12,8
Burití	35,0	21,8	15,4	11,5
Dendê	43,0	27,0	18,5	13,5
Mamona	285,0	140,0	82,0	52,0
Babaçu	36,5	23,0	16,2	12,0
cotieira	25,8	16,7	12,0	9,2

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 alcaloide 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 à 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 (SOUZA, 2012).

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). A maior parte das cultivares plantada comercialmente no Brasil possui 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.

A Índia, a China e o Brasil são os maiores produtores de Mamona do mundo. Sendo o estado da Bahia o maior produtor nacional. Nos anos 80 e 90 a produção interna de óleo sofreu decréscimo, mostrando a decadência da cultura da mamona neste período, que provocou a redução da renda bruta dos produtores rurais. A partir de lançamentos de programas governamentais que visam incentivar e aperfeiçoar a produção do biodiesel no País nos últimos anos, a produção de mamona apresenta sinais de recuperação constatando-se, através da safra 2004, uma extraordinária recuperação da produção nacional em relação aos últimos 10 anos. Na Figura 2.11 constam os maiores produtores mundiais entre 2011 e 2013. Sendo a produção nacional de mamona em 2013 de aproximadamente 0,2 milhões de toneladas.

Figura 2.11: Produção de mamona dos maiores produtores mundiais, entre 2011 e 2013 (FAO, 2013).



Nas Tabelas 2.3 e na 2.4 constam as características físicas e químicas do óleo de Mamona, respectivamente.

Tabela 2.3 : Valores físicos de referência do óleo de Mamona (COSTA, 2006).

ÍNDICES	UNIDADE	VALOR DE REFERÊNCIA
Peso específico	g/cm <sup>3</sup>	0,945 - 0,965
Índice de refração	gl2/100g	1,473 - 1,477
Índice de saponificação	MG KOH/g	176 - 187

Tabela 2.4 : Constituintes químicos do óleo de Mamona (COSTA, 2006).

ÁCIDOS GRAXOS	(%)
Rinoléico	84 - 91
Oléico	3,1 - 5,9
Linoléico	2,9 - 6,5
Esteriárico	1,4 - 2,1
Palmítico	0,9 - 1,5

## 2.5 Óleo de Linhaça

O óleo de linhaça é um óleo secante pertencente à família das Lináceas – *Linum Usitatissimum* (Figura 2.12) derivado da semente do linho (REDA & CARNEIRO, 2007).

O linho é cultivado em regiões temperadas e os quatro maiores produtores mundiais são o Canadá, os Estados Unidos, a Índia e a China, seguidos por Ucrânia, Rússia, Bélgica, França e Alemanha. Na América do Sul os principais produtores são a Argentina e o Brasil (TRUCOM, 2006).

As condições de plantio e o efeito do clima acentuam as diferenças nos tipos e composição final do linho oleaginoso (linhaça) e do linho têxtil (linho de fibra). A composição típica do óleo de Linhaça varia de acordo com a região e plantio. Na Tabela 2.5 consta a composição típica de ácidos graxos no óleo de linhaça natural.

Figura 2.12 : Flores de Linho (FONSECA, 2009).



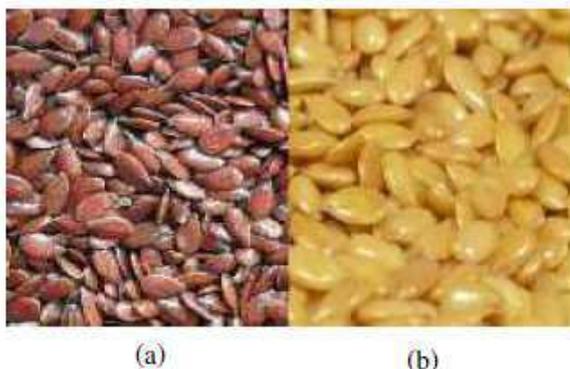
Tabela 2.5 : Composição típica de ácidos graxos no óleo de linhaça natural (FONSECA, 2009).

ÁCIDOS GRAXOS	(%)	NOME SISTEMÁTICO	NOTAÇÃO
Palmítico	4-10	Hexadecanóico	C16
Esteárico	2-8	Octadecanóico	C18
Oléico	10-24	(9Z)-octadeca-9-enóico	C18:1
Linoléico	12-19	(9Z, 12Z)-octadeca-9,12-dienóico	C18:2
Linolênico	48-60	(9Z, 12Z, 15Z)-octadeca-9,12,15-trienóico	C18:3

Conhecida popularmente como linhaça, a semente do linho é plana, ovalada e pontiaguda em uma das bordas. É uma semente pequena, que normalmente mede cerca de 2,5 × 5,0 × 1,5 mm (TRUCOM, 2006). Duas variedades básicas podem ser encontradas: a linhaça dourada, mais presente no hemisfério norte (Estados Unidos e Canadá, predominantemente) e a marrom, cultivada no Brasil (Figura 2.13).

Edésio Júnior (2011) descreve as formas de obtenção do óleo de Linhaça por meio das técnicas de extrator fixo, extração a frio, arraste a vapor extração supercrítica.

Figura 2.13 : Variedade da linhaça. (a) marrom; (b) dourada (GALVÃO, 2009).



A coloração da semente é determinada pela quantidade de pigmento presente na camada externa da semente, uma característica que pode ser modificada através das práticas normais de cultivo. Para os consumidores, a decisão de comprar uma coloração particular pode estar baseada no preço e aparência do produto, uma vez que os valores nutricionais da linhaça marrom e dourada são similares (GALVÃO, 2009).

Segundo Galvão (2009), a cultura de produção do linho foi trazida para o Brasil em 1550 pelos colonos russos, alemães, poloneses, italianos e ucranianos que se instalaram no sul do país. Nesta região encontraram as condições propícias para o cultivo. Até 2005 existia no Brasil somente o plantio da variedade de cor marrom. Contudo, uma empresa brasileira realizou no final de 2006 a primeira colheita, de 100 toneladas, da variedade dourada, que até então era importada do Canadá.

Na América do Sul o maior produtor de linhaça é a Argentina com cerca de 80 toneladas/ ano, o Brasil produz apenas 21 toneladas/ano. Em nosso país a linhaça foi introduzida no século XVII em Florianópolis, de onde se difundiu para São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul (LIMA et. al. , 2007). Segundo Nogueira et. al. (2010), no Brasil a linhaça ainda é cultivada no Rio Grande do Sul, o maior produtor do país, nos municípios de Panambi, Santa Barbara, Ijuí, São Luiz Gonzaga, Santa Rosa, São Miguel das Missões, Guarani das Missões, Três de Maio, Tupanciretã, Santo Augusto e proximidades. Segundo dados do IBGE, em 2010, a área plantada com linho eram de 16584 hectares e o rendimento médio por hectare era de 974 quilogramas, mas a produção pode atingir até 1,5 toneladas/ ha (OLIVEIRA et. al. 2012).

As aplicações da linhaça são diversas, na indústria a planta representa um papel muito importante. As fibras retiradas do caule são utilizadas na produção de um tecido muito valorizado no mercado, o linho (RENNEBAUM et. al. 2002). As sementes podem ser utilizadas para produção de óleo e farelo. O óleo é vendido como matéria-prima para empresas produtoras de tintas, vernizes, resinas, sabões, linóleo e outros fins industriais (BICKERT, LÜHS e FRIEDT, 1994), podendo ser também encontrado encapsulado ou engarrafado para fins alimentícios; já o farelo, pode ser produzido para o consumo humano ou mais comumente, ser utilizado como matéria-prima para produção de rações animais. As sementes são utilizadas ainda na fabricação de pães, bolos, biscoitos, barras de cereais e suplementos alimentares (GALVÃO, 2009).

O óleo de Linhaça possui a particularidade, dentre as oleaginosas, de possuir o maior índice de oxidação – IO. A oxidação de óleos vegetais ocorrerá a diferentes velocidades, levando em consideração a quantidade e posição das insaturações na cadeia graxa. Compostos insaturados são significativamente mais susceptíveis à oxidação que os compostos saturados. Essa tendência à oxidação cresce na medida em que aumenta o grau de insaturação. Esta propriedade é variável nos óleos vegetais e depende do

grau de insaturação e tamanho das cadeias graxas que os compõem. Podendo também ser influenciada pela presença de ramificações e posicionamento das insaturações (MELO 2010).

Uma forma de avaliar este parâmetro é dada pelo índice de oxidação I.O (WAYNICK, 2005 apud MELO, 2010), definido na Equação 2.2.

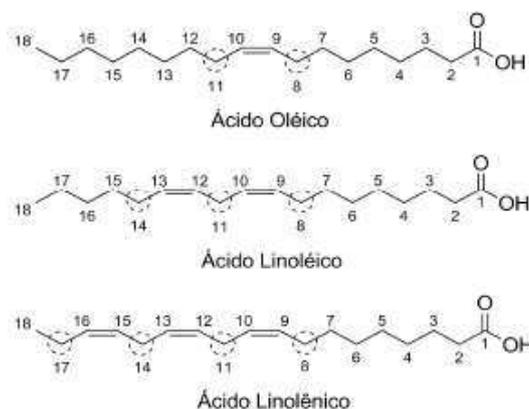
$$IO = \frac{0,02 \times (\% \text{oléico}) + (\% \text{linoléico}) + 2 \times (\% \text{linolênico})}{100} \quad (2.2)$$

Tabela 2.6 : Índice de oxidação para os óleos vegetais (MELO, 2010).

ÓLEOS VEGETAIS	ÍNDICE DE OXIDAÇÃO
Amedoim	0,317
Andiroba	0,132
Babaçu	0,047
Buriti	0,062
Crambe	0,168
Dendé	0,152
Gergilim	0,433
Linhaça	1,058
Macaúba	0,062
Moringa	0,023
Oiticica	0,475
Pequi	0,011
Pinhão Manso	0,375
Uva	0,464

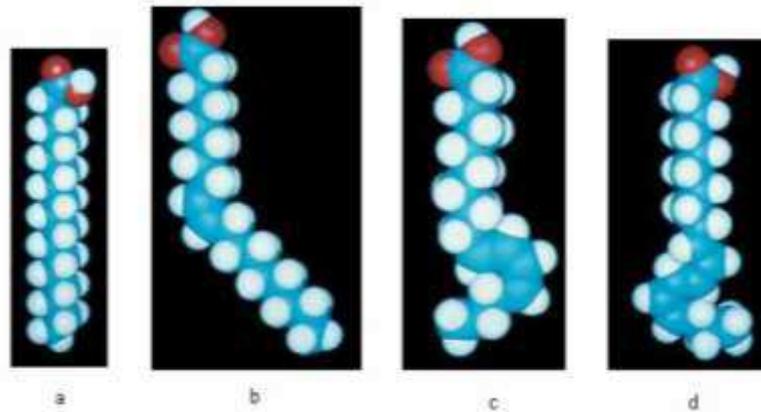
Os óleos vegetais compostos por ácidos graxos que apresentam polinsaturações são mais propensos a processos oxidativo, principalmente aqueles com proporções variáveis dos ácidos oléico (C18:1), linoléico (C18:2) e linolênico (C18:3) (KNOTHE, et. al., 2006). A velocidade das reações de oxidação para estas moléculas depende do número e da posição das duplas ligações (FREEDMAN & BAGBY, 1989 apud MELO, 2010).

Figura 2.14 : Posições nas cadeias graxas mais propensas à oxidação (MELO, 2010).



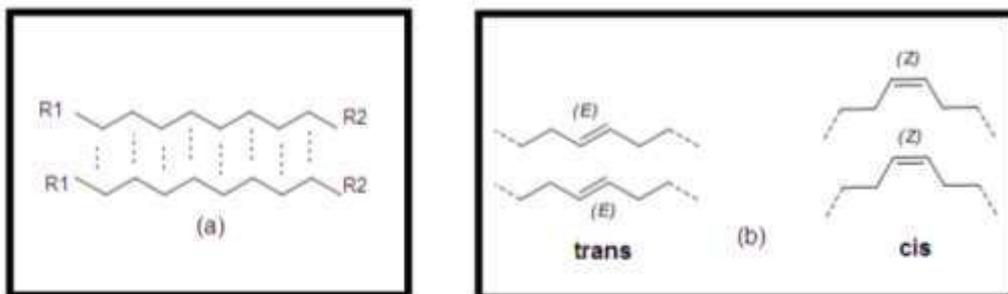
Quando comparados, os ácidos graxos saturados se encontram em uma conformação linear, flexível em estado de menor energia, possibilitando uma interação molecular mais efetiva, enquanto os ácidos graxos insaturados apresentam dobramentos na cadeia carbônica, para cada dupla ligação presente, Figura 2.14. A presença dessas insaturações na molécula torna as interações moleculares menos eficientes (desfavorecimento estérico) e a viscosidade menor (CURI et. al. 2002 apud MELO, 2010).

Figura 2.15: (a) Ácido esteárico C18:0; (b) Ácido oleico C18:1; (c) Ácido oleico C18:2; (d) Ácido oleico linolênico C18:3 (MELO, 2010).



O aumento no tamanho das cadeias graxas favorece o aumento da área superficial, traduzindo-se em maior efetividade das forças de Van der Waals nas cadeias próximas, Figura 2.16a. Devido à presença de insaturações pode ocorrer isomeria na configuração *cis* (Z) ou *trans* (E) da cadeia graxa, Figura 2.16b. A ocorrência da configuração *trans* promove um incremento na linearidade da cadeia carbônica, o que pode favorecer interações intermoleculares, fazendo com que as propriedades físicas destes compostos se assemelhem ao seu correspondente saturado, apresentando maior viscosidade (CHRISTIE, 1989 apud MELO, 2010).

Figura 2.16 : Interações intermoleculares de Van der Waals nas moléculas graxas (a) e configuração (cis)/(trans) (b) (MELO, 2010).



## 2.6 Biodiesel a partir do Óleo de Mamona e do Óleo de Linhaça

Segundo Sá Parente (2003) os acelerados e incontidos aumentos do preço do petróleo iniciados em 1973 geraram uma nova consciência mundial a respeito da produção e consumo de energia, especialmente quando originária de fontes não renováveis, como é o caso dos combustíveis fósseis. Alternativamente, visando minimizar a crise e manter-se em situação confortável, o mundo buscou ações à superação desta crise, seja conservando e economizando energia ou tentando desenvolver fontes alternativas de energia.

O biodiesel é um combustível renovável, biodegradável e ambientalmente correto, sucedâneo ao óleo diesel fóssil, comparado ao óleo diesel derivado do petróleo, o biodiesel pode reduzir em 78% as emissões líquidas de gás carbônico, considerando-se a reabsorção pelas plantas. Também, reduz 90% as emissões de fumaça e praticamente elimina as emissões de dióxido de enxofre. É importante frisar que o biodiesel pode ser usado em qualquer motor de ciclo diesel, com pouca ou nenhuma necessidade de adaptação (HOLANDA, 2004).

O uso de óleo vegetal no motor diesel não é uma novidade. As primeiras experiências com motores de combustão por compressão foram conduzidas com óleo de amendoim. Em 1900 o inventor do motor diesel, Rudolf Diesel, conduziu um protótipo de motor na Exposição Universal de Paris com uso do óleo de amendoim. Mas, o desenvolvimento dos derivados de petróleo e a ampla oferta de combustíveis de origem fóssil tornaram essa alternativa desinteressante do ponto de vista econômico. Em 1937 o cientista belga G. Chavenne descobriu e patenteou o processo de transesterificação, o qual diminuía a viscosidade do óleo vegetal e melhorava seu processo de combustão no interior do motor (KNOTHE, 2001). Assim, o nome "biodiesel" foi dado ao óleo vegetal transesterificado para descrever seu uso como combustível em motores do ciclo diesel (CERBIO, 2006).

No Brasil, as referências mostram que o uso energético dos óleos vegetais como combustível ocorre desde a década de 20. O Instituto Nacional de Tecnologia (INT), no instituto de óleo do Ministério da Agricultura e no Instituto de Tecnologia Industrial de Minas Gerais iniciou as pesquisas para os combustíveis alternativos e renováveis (BRASIL, 1985).

O biodiesel também é uma alternativa para geração de empregos e renda nas regiões mais carentes do Brasil, podendo ainda ser exportado e deixar o país numa situação de independência energética.

Segundo Carneiro (2003) a mamona no que se refere ao seu potencial para a produção de biodiesel é considerada como excelente devido ao seu alto teor de óleo, de 48% a 50%. O óleo de mamona quando se trata da produção de biodiesel apresenta a vantagem de 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. Além disso, as plantações de oleaginosas, como é o caso da mamona,

servem de cobertura do solo, protegendo contra a erosão (ALVES e CARVALHO, 2004 apud COSTA, 2006).

Estudos mostram que a lubricidade do biodiesel de mamona é a maior, entre os produzidos a partir de outras matérias primas (PARENTE 2003). Também funciona como uma espécie de “Vela Química” tendo mais oxigênio, cerca de 4% a mais do que os demais óleos, que apresentam, quando transesterificados, média de 11,5% de oxigênio (BELTRÃO, 2003 apud COSTA, 2006).

Os países do continente europeu foram os primeiros a aderirem à produção comercial do biodiesel no mundo. O principal país produtor do mundo é a Alemanha, seguido da França e da Itália, conforme Figura 2.17. Segundo Osaki & Batalha (2008) a produção mundial está em torno de doze milhões de toneladas por ano. Já o mercado de óleo vegetal no Brasil tem como a principal fonte de óleo a soja. O caroço de algodão, o girassol, a mamona e a palma participam com uma pequena parcela desse mercado. Na Figura 2.18, observa-se que a soja foi a principal oleaginosa esmagada nas unidades agroindustriais do Brasil no ano de 2006, sendo processadas 83% das unidades. O caroço de algodão é esmagado em 7% das unidades esmagadoras, 2% dendê (palma) e mamona, 1% linhaça e 5% multi-produto (soja, girassol, canola, babaçu e algodão). A produção de biodiesel, conforme evidencia a Figura 2.19, tem crescido substancialmente desde o ano de 2007, atingindo em 2014 mais de 3 milhões de m<sup>3</sup>. A produção por região tem as regiões Centro-oeste e Sul como as maiores produtoras nacionais de biodiesel somando mais de 80% da produção nacional conforme Figura 2.20.

Figura 2.17: Distribuição dos principais países produtores de biodiesel no mundo no ano de 2005 (OSAKI & BATALHA, 2008).

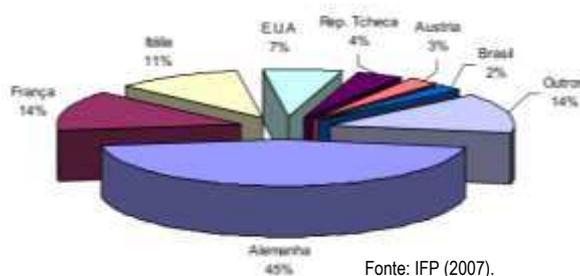


Figura 2.18 : Principais oleaginosas esmagadas nas indústrias brasileiras no ano de 2006 (OSAKI & BATALHA, 2008).

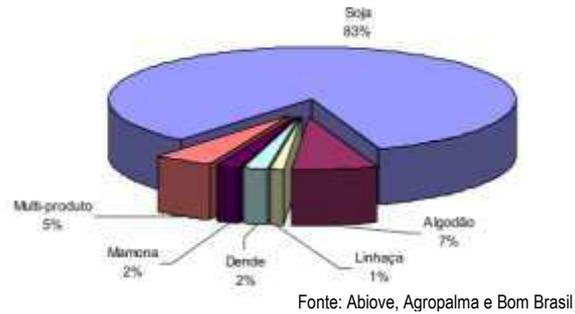


Figura 2.19: Produção de biodiesel de 2005 a 2014 no Brasil.

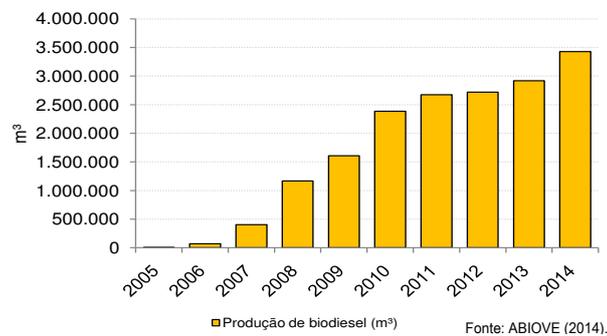
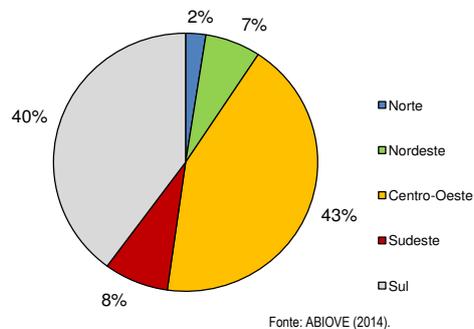


Figura 2.20 : Produção de biodiesel de 2005 a 2014 no Brasil.



O preço do óleo de Mamona e de Linhaça 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. Na Figura 2.21 constam os preços da tonelada de óleo de Mamona e de Linhaça.

Figura 2.21: Preço da tonelada de óleo de Mamona e de Linhaça (BIOMERCADO, 2016).



## 2.7 Pesquisas com Oleaginosas adicionadas ao Ligante Asfáltico

Neste item, diante da falta de trabalhos científicos de cimentos asfálticos modificados com oleaginosas, foram destacados três trabalhos a seguir apresentados para servirem de base e comparações, se for o caso, com os resultados obtidos na presente pesquisa.

### Souza (2012)

SOUZA (2012) realizou pesquisa utilizando o óleo de Mamona como aditivo ao ligante asfáltico CAP 50/70. O estudo objetivou avaliar o potencial de utilização do óleo de Mamona em reduzir as temperaturas de usinagem e compactação (TUC) ao adicioná-lo ao ligante convencional CAP 50/70.

Em síntese, o autor conseguiu uma 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 satisfatórios, indicando que “o óleo de mamona” se mostra como um aditivo promissor para as misturas asfálticas usinadas a quente” (SOUZA, 2012).

SOUZA (2012) realizou dosagem Superpave e, em seguida, ensaios de viscosidade rotacional, Lottman modificado, resistência à tração e módulo de resiliência. O percentual de 5% de óleo de Mamona adicionado ao ligante foi identificado como sendo o teor ótimo em face dos resultados obtidos naquela pesquisa. Nas Figuras 2.22, 2.23 e na 2.24 são apresentados os resultado dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, Lottman modificado e módulo de resiliência.

Figura 2.22: Resultados de Resistência à Tração Diametral em função do acréscimo de óleo de Mamona (SOUZA, 2012).

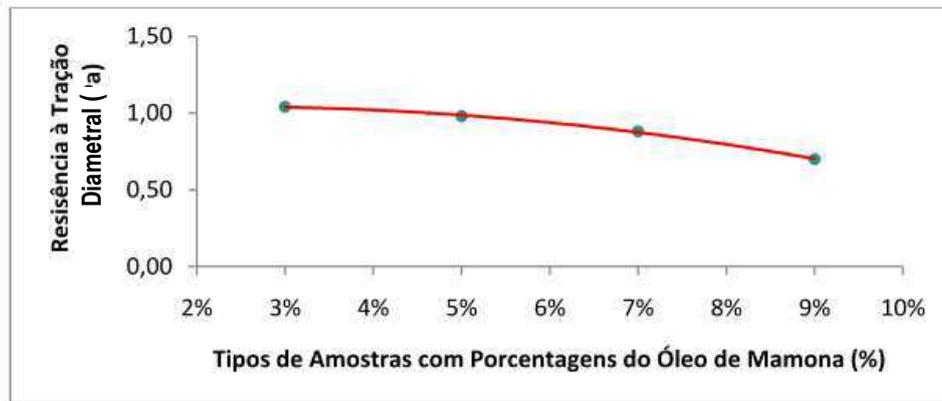


Figura 2.23: Resultados do ensaio Lottman Modificado em função do acréscimo de óleo de Mamona (SOUZA, 2012).

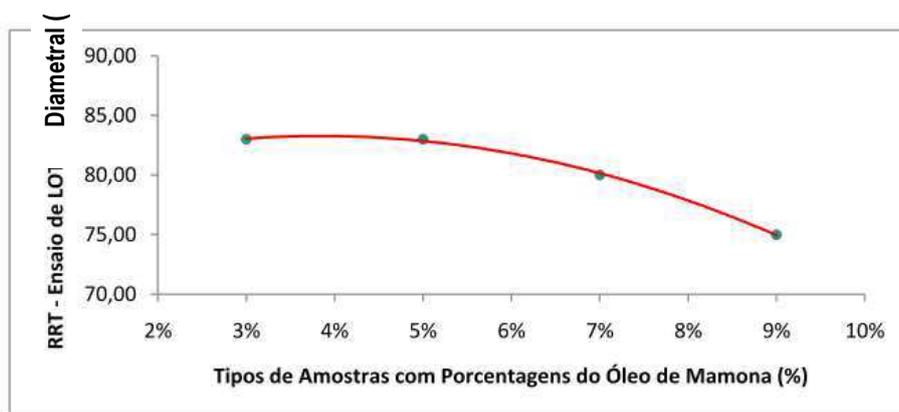
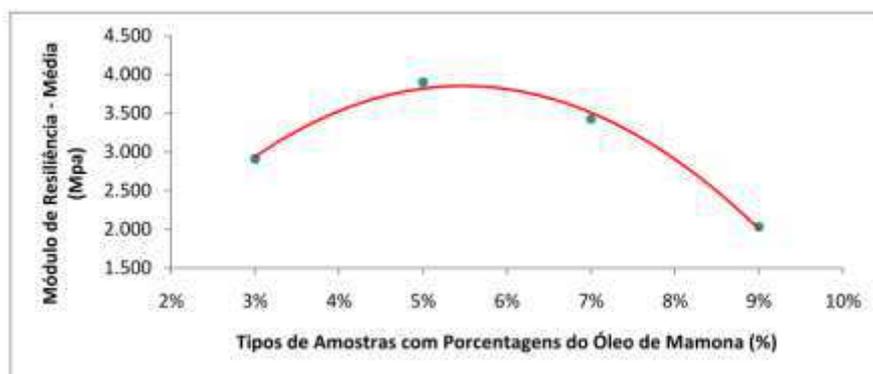


Figura 2.24: Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência em função do acréscimo de óleo de Mamona (SOUZA, 2012).



**Leni et. al. (2012)**

Leni et. al. (2012) estudaram o uso de produtos vegetais como modificadores de cimento asfáltico. Os óleos vegetais estudados foram de Mamona, Algodão, Dendê, Soja e a cera de Carnaúba e óleo de fritura (Soja). Na Tabela 2.7 constam as nomenclaturas utilizadas pelos autores para identificar cada asfalto modificado.

Tabela 2.7 : Identificação dos asfaltos modificados. (LENI et. al. 2012).

Modifier	Code	Modified asphalt
Carnaúba wax	11	35/50
Cotton biodiesel	21	30/45
Cotton oil	22	30/45
Palm oil	23	30/45
Castor oil	24	30/45
Soybean used frying oil	25	30/45
Commercial Lignin	A	50/70
Black liquor lyophilized - lignin	B	50/70

Na Tabela 2.8 constam resultados do CAP50/70 puro e modificado com adição de cera de Carnaúba. Observa-se que a adição da cera gerou, dentre outras melhorias, um aumento do PG (classificação de desempenho segundo a metodologia Superpave) e promoveu uma redução na viscosidade do CAP 50/70, o que proporciona uma redução no consumo de combustível na usinagem, de fumos e das emissões de poluentes (LENI et. al. 2012).

Tabela 2.8 : Comparação entre o CAP 50/70 e modificado com cera de carnaúba (LENI et. al. (2012).

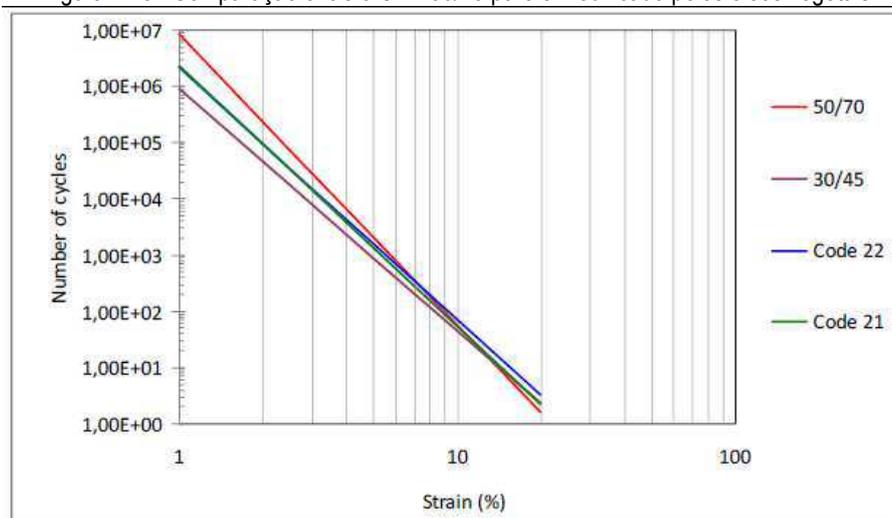
Test:	50/70 + 2% wax	50/70 + 4% wax	50/70
Rotational viscosity at 135°C, cP	280.0	244.5	325
Rotational viscosity at 155°C, cP	124.3	109.5	177
Mixing temperature ( 2P), °C	148	143	156
Penetration at 25°C, (Pen) 1/10mm	49	45	68
Penetration index	- 0.3	+ 1.8	- 1.5
Softening point, °C (RB)	54.1	65.2	46
Dynamic shear - G*/sen δ ≥ 1.0 kPa, °C	1.5	2.6	0.8
Test temperature, °C	64	64	64
After RTFOT			
Mass loss, %m/m	- 0.104	- 0.096	- 0.150
Dynamic shear - G*/sen δ ≥ 2.2 kPa, °C	2.45	4.071	1.53
Test temperature	64	64	64
Softening point, °C	58.8	67	50
MSCR at 64°C			3.8
J <sub>m, 3200</sub> < 4 Standard – S			
J <sub>m, 3200</sub> < 2 Heavy – H			
J <sub>m, 3200</sub> < 1 Very heavy – V	0.06	0.04	
After RTFOT + PAV			
Dynamic shear - G*sen δ ≤ 5 MPa, °C	3700		3200
Test temperature, °C	25	-	25
Creep stiffness - S ≤ 300 MPa and m ≥ 0.300, °C			
Test temperature, °C	-6	-6	-6
After 24 hours at -6°C			
Creep stiffness - S ≤ 300 MPa and m ≥ 0.300, °C	-	0.308	0.316
Test temperature, °C		-6	-6
Performance grade – PG	64-16	67-16	58-16

Na Tabela 2.9 constam os resultados obtidos para os demais óleos vegetais que foram adicionados ao CAP 30/45. No caso do ensaio de fadiga LAS proposto para substituir o parâmetro reológico da especificação ASTM D6373 ( $G^* \text{sen } \delta$ ) mostrou que os ligantes modificados com os de óleos vegetais melhoraram a vida de fadiga, eles são classificados como 30/45, mas o número de ciclos de fadiga ficou entre o CAP 30/45 e o CAP 50/70 puros (ver Figura 2.25), sendo o Code 21 – cotton biodiesel e Code 22 – cotton oil.

Tabela 2.9 : Comparação entre o CAP 30/45 puro e modificado pelos óleos vegetais.

Tests	30/45	Biodiesel	Used frying oil	Castor oil	Cotton oil	Palm oil
Rotational viscosity at 135°C, cP	430	493.5	444	484	450	455
Penetration at 25°C, (Pen) 1/10mm	37	40	40	37	42	37
Penetration index	-1.4	-0.8	-0.9	-0.8	-0.8	-1.0
Softening point, °C (RB)	52	53.7	53.5	54.3	53.5	53.4
Dynamic shear - $G^*/\text{sen } \delta \geq 1.0 \text{ kPa}$ , °C	1.2	1.2	1.0	1.1	-	-
Test temperature, °C	70	70	70	70	67	67
Mass loss, %m/m	+0.1	-0.9	-0.7	-0.5	-0.1	-0.1
Dynamic shear - $G^*/\text{sen } \delta \geq 2.2 \text{ kPa}$ , °C	2.5	3.7	2.5	2.8	-	-
Test temperature, °C	70	70	70	70	67	67
Softening point, °C	56	62.4	-	61.3	57.6	57.6
Dynamic shear - $G^* \text{sen } \delta \leq 5 \text{ MPa}$ , °C						
Test temperature, °C	31	28	28	28	25	28
Creep stiffness, $S \leq 300 \text{ MPa m} \geq 0.300$ , °C						
Test temperature, °C	0	0	0	-6	-6	-6
Performance grade – PG	70-10	70-10	70-10	70-16	67-16	67-16

Figura 2.25 : Comparação entre o CAP 30/45 puro e modificado pelos óleos vegetais.



Os ensaios mecânicos realizados com o CAP 50/70 e o CAP 30/45 e esses com adições dos óleos vegetais apresentaram um bom comportamento (ver Tabela 2.10). O Flow Number dos asfaltos modificados com óleos vegetais foram superiores ao do CAP 50/70 e o módulo dinâmico ficou entre o do 30/45 e do 50/70. O óleo de rícino parece ser mais resistente, seguido pelo biodiesel. O óleo de fritura usado pode ter perdido algumas propriedades de óleos vegetais, quando submetido ao calor, seu comportamento foi o mais pobre entre eles.

Tabela 2.10 : Comparação dos resultados mecânicos dos CAPS puros e modificados com óleos vegetais.

<b>CARNAÚBA WAX</b>						
25°C	25°C	25°C	60°C	60°C	60°C	FN
E* @ 10Hz	Phase angle	E* x sen delta	E* @ 5Hz	Phase angle	E* / sem delta	
6921			807			240
<b>CASTOR OIL</b>						
25°C	25°C	25°C	60°C	60°C	60°C	FN
E* @ 10Hz	Phase angle	E* x sen delta	E* @ 5Hz	Phase angle	E* / sem delta	
10923	18,28	3426,1	416,1	33,54	753,1	225
<b>BIODIESEL</b>						
25°C	25°C	25°C	60°C	60°C	60°C	FN
E* @ 10Hz	Phase angle	E* x sen delta	E* @ 5Hz	Phase angle	E* / sem delta	
9147,9	19	2978,3	356,9	32,83	658,5	178
<b>USED FRYING OIL</b>						
25°C	25°C	25°C	60°C	60°C	60°C	FN
E* @ 10Hz	Phase angle	E* x sen delta	E* @ 5Hz	Phase angle	E* / sem delta	
8469,3	19,63	2845,2	311,3	31,82	590,4	147
<b>50/70</b>						
25°C	25°C	25°C	60°C	60°C	60°C	FN
E* @ 10Hz	Phase angle	E* x sen delta	E* @ 5Hz	Phase angle	E* / sem delta	
5412			215			78
<b>30/45</b>						
25°C	25°C	25°C	60°C	60°C	60°C	FN
E* @ 10Hz	Phase angle	E* x sen delta	E* @ 5Hz	Phase angle	E* / sem delta	
12455			638			360

#### Silveira et. al. (2014)

Outra pesquisa com oleaginosa foi realizada por Silveira et. al. (2014) que avaliaram as propriedades reológicas sob altas temperaturas de ligantes asfálticos modificados com óleo da moringa, conforme resultados constantes nas Tabelas 2.11 e 2.12. Os autores concluíram que o CAP Puro apresenta penetração e ponto de amolecimento compatíveis com a sua classificação. A adição sucessiva de óleo de moringa ao CAP Puro teve como resultados a diminuição do ponto de amolecimento e aumento da penetração. A adição de óleo nas misturas até o valor de 1% apresentou valores de penetração e ponto de amolecimento compatíveis com o CAP Puro. Isto indica que o acréscimo de óleo de moringa possui limitações, as quais são responsáveis por assegurarem as propriedades aceitáveis dos ligantes modificados. Para a porcentagem de 7%, além de não ser possível obter resultados para a penetração, o ponto de amolecimento ocorreu em baixa temperatura. Esta, em alguns lugares, está próximo da temperatura média ambiente, o que inviabiliza a aplicação deste teor de mistura.

Tabela 2.11: Resultados do ensaio de ponto de amolecimento: CAP puro; CAP + Moringa variando de 1%, 3% e 7%.

Ponto de Amolecimento	Tipo de Ligante			
	CAP PURO	CAP + 1% de moringa	CAP + 3% de moringa	CAP + 7% de moringa
Média	46,5	45,15	43,25	30,25

Tabela 2.12: Resultados do ensaio de penetração : CAP puro; CAP + Moringa variando de 1%, 3% e 7%.

Penetração	Tipo de Ligante			
	CAP PURO	CAP + 1% de moringa	CAP + 3% de moringa	CAP + 7% de moringa
Média	57	67	90	---

Na Tabela 2.13 pode-se observar que as perdas de massa no ligante puro é a menor em porcentagem. Os demais ligantes modificados por moringa tiveram aumento de perda de massa, muito provavelmente devido às características antioxidantes e suas propriedades tensoativas, no caso de agente rejuvenescedor. Entretanto, todos os teores atendem ao máximo preconizado por norma (SILVEIRA et. al. 2014).

Tabela 2.13: Resultados da perda de massa após o RTFO.

RTFO	Tipo de Ligante			
	CAP PURO	CAP + 1% de moringa	CAP + 3% de moringa	CAP + 7% de moringa
Varição de massa (%)	0,037	0,028	0,11	0,098

## 2.8 Propriedades Reológicas do CAP

A definição de reologia como “estudo da deformação e fluxo da matéria” foi proposta pela Sociedade Americana de Reologia por ocasião de sua fundação, em 1929. O primeiro encontro realizado pelos membros dessa sociedade foi com a intenção de discutir sobre as propriedades e comportamentos de materiais divergentes como o asfalto, lubrificantes, tintas, plásticos e borrachas, assim como as demais disciplinas que pudessem estar envolvidas no assunto (BARNES et. al. 1993).

Segundo Sobreiro (2014) o comportamento reológico do ligante asfáltico é complexo, tendo em vista que está submetido a uma ampla variação de temperatura, carregamento dinâmico do tráfego, exposição à diferentes frequências de carregamento, bem como ao efeito de envelhecimento que proporciona modificações químicas no material. Atrelado a isso, quando o ligante asfáltico é modificado, se torna mais sensível a todos esses fatores, dificultando, ainda mais, a caracterização das suas propriedades.

Segundo Barnes et. al. (1993) os ligantes asfálticos são materiais complexos que podem apresentar comportamento elástico, viscoso e viscoelástico, em função de fatores como temperatura, nível de tensão e tempo de atuação do carregamento.

As novas especificações são conhecidas como Superpave e apresentam procedimentos diferenciados de ensaios de ligantes e misturas asfálticas. Em relação à avaliação de ligantes asfálticos, são enfatizadas as propriedades reológicas mediante ensaios mais representativos do que os ensaios denominados empíricos, como por exemplo, penetração, ponto de amolecimento, viscosidade SayboltFurol, recuperação elástica e ductilidade (SOBREIRO, 2014).

Os fatos expostos motivaram pesquisadores envolvidos no programa SHRP ao aprofundamento da compreensão do comportamento reológico dos ligantes asfálticos. O “Superior Asphalt Pavements” (Superpave) é o produto final de um programa de pesquisas realizado nos Estados Unidos, o “Strategic Highway Research Program” (SHRP), desenvolvido a partir dos anos 80 devido a um grande número de ocorrência de falhas precoces nos revestimentos dos pavimentos, que veio unificar a classificação de asfaltos dos Estados Unidos da América e do Canadá. Este sistema leva em consideração a performance do material frente às condições específicas de tráfego, clima e seção estrutural do pavimento (NOGUEIRA, 2008).

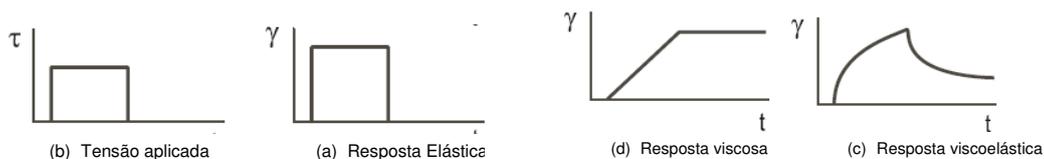
Segundo Nogueira (2008) o maior objetivo do programa foi avaliar e relacionar propriedades que poderiam interferir no desempenho do material asfáltico quando aplicado em campo. Este objetivo foi atingido e propriedades relacionadas são avaliadas na especificação proposta, pro meio das seguintes exigências:

- rigidez medida pelo reômetro com valor mínimo de 1,0 kPa é especificada para o material asfáltico novo para a prevenção de perda de consistência (amolecimento) exagerada e deformação permanente em temperaturas elevadas;
- rigidez medida pelo reômetro com valor mínimo de 2,2 kPa é especificada para o material asfáltico após o envelhecimento de curto prazo, a fim de garantir adequada resistência à deformação permanente imediatamente após a construção;
- rigidez medida pelo reômetro com valor máximo de 5.000 kPa é especificada para o material asfáltico após o envelhecimento de longo prazo, para a prevenção de trincamento devido à fadiga, causado por excesso de dureza do material;
- rigidez medida pelo reômetro com valor máximo de 300 MPa e mínima declividade (slope) no ensaio creep são especificadas para limitar a rigidez do material a baixas temperaturas; e

- Uma alta rigidez medida pelo ensaio creep é permitida pela especificação se uma mínima deformação na tração (1%) na ruptura for atingida.

O ensaio de fluência é um dos mais simples para a caracterização do comportamento tensão-deformação de um material. Neste ensaio, uma carga de magnitude constante é aplicada ao material no instante  $t_0$ . No instante  $t_i$ , essa carga é então removida. As diferenças entre os comportamentos elástico, viscoso e viscoelástico podem ser esquematizadas segundo indicado pela Figura 2.26 (FAXINA, 2006).

Figura 2.26 : Comportamento ideal dos materiais (Adaptado de FAXINA, 2006).



Os cimentos asfálticos apresentam comportamento viscoelástico, exibem dissipação viscosa e recuperação elástica. Sua resistência à deformação permanente depende tanto da temperatura quanto do tempo de aplicação da carga. Em condições extremas de baixa temperatura e pequeno tempo de carregamento os CAP se comportam como sólido elástico e a altas temperaturas e grandes tempos de carregamento como líquidos viscosos (LEITE, 1999).

Segundo Airey (2003) o ligante asfáltico é um material termoplástico, semissólido à temperatura ambiente, viscoelástico, que se comporta como um sólido vítreo a baixas temperaturas e/ou durante carregamento rápido (pequeno tempo de aplicação de carga – alta frequência de aplicação) e como um fluido viscoso a altas temperaturas e/ou durante carregamento lento (longo tempo de aplicação de carga – baixa frequência de aplicação). A resposta do ligante asfáltico ao esforço é, por consequência, dependente de ambos, temperatura e tempo de aplicação de carga. Consequentemente, a reologia do ligante asfáltico é definida em função da sua resposta à tensão/deformação/tempo/temperatura.

É importante entender a reologia dos ligantes asfálticos por três razões: (1) permite diferenciar ligantes asfálticos obtidos de diferentes petróleos e por diferentes processos de refino; (2) orienta a seleção das temperaturas para as operações de usinagem e construção das camadas asfálticas; e (3) permite determinar como as propriedades reológicas se relacionam com os defeitos do pavimento. Uma das principais conclusões do programa SHRP foi que o comportamento viscoelástico dos ligantes asfálticos, sob diferentes níveis de tensão e de temperatura, deve ser compreendido para que as especificações relativas ao desempenho estejam diretamente relacionadas aos defeitos do pavimento (SHENOY, 2001, apud FAXINA, 2006). O programa SHRP indicou que é mais promissor relacionar as propriedades físicas e não as químicas dos ligantes asfálticos ao desempenho das misturas asfálticas em pista (ANDERSON et. al., 1994 apud FAXINA, 2006).

A viscosidade é considerada a mais importante dentre as propriedades dos materiais e qualquer trabalho prático que requeira um conhecimento da resposta do material automaticamente se voltaria para a viscosidade em uma primeira instância (BARNES et. al. 1989). Acrescenta Faxina (2006) que na área de pavimentação a viscosidade é empregada na determinação das temperaturas para operações de bombeamento do ligante asfáltico e de usinagem, de lançamento e de compactação de misturas asfálticas. Do ponto de vista de reologia, os ligantes asfálticos são materiais termoplásticos, ou seja, sua consistência e comportamento reológico se modificam conforme a temperatura. Sob determinadas condições, eles podem se comportar como líquidos newtonianos, enquanto sob outras, podem se apresentar como líquidos não-newtonianos.

### **2.8.1 Métodos para Caracterização Reológica dos Ligantes Asfálticos**

Dentre os ensaios tradicionalmente utilizados para a caracterização reológica dos ligantes asfálticos, citam-se: medidas de penetração, de ductilidade, ponto de ruptura Frass e do ponto de amolecimento. Estes possuem natureza empírica, apresentando limitações intrínsecas que não possibilitam a determinação de propriedades fundamentais relacionadas com o desempenho das misturas em campo (ANDERSON et. al., 1991, ANDERSON & KENNEDY, 1993).

Segundo FAXINA (2006) as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos podem ser separadas em duas categorias: propriedades reológicas fundamentais e propriedades reológicas empíricas. As empíricas correspondem as medidas obtidas de ensaios de natureza puramente empírica, dentre as quais as mais comuns são as medidas de penetração, de ponto de amolecimento, de viscosidade Saybolt Furol, de ductilidade e de retorno elástico. As fundamentais são fornecidas por ensaios que medem propriedades fundamentais, como viscosidade aparente, medida no viscosímetro rotacional (Brookfield), viscosidade cinemática, medida no viscosímetro capilar, módulo complexo, ângulo de fase, módulo de armazenamento, módulo de dissipação e viscosidade complexa, medidas no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), rigidez sob baixas temperaturas e taxa de relaxação sob baixas temperaturas, obtidas no reômetro de flexão em viga (BBR).

Os ensaios de cisalhamento dinâmico são considerados mais efetivos na caracterização do comportamento viscoelástico dos ligantes asfálticos. As deformações empregadas nesse tipo de ensaio são relativamente pequenas, tornando fácil a avaliação do material na região de viscoelasticidade linear. Além disso, os ensaios de cargas repetidas (com repouso) simulam razoavelmente a ação das cargas do tráfego, que representam as principais solicitações que o ligante asfáltico está sujeito em campo. Atualmente, uma grande diversidade de modelos de reômetros de cisalhamento dinâmico, capazes de realizar esses ensaios de maneira rápida e precisa, estão disponíveis no mercado, o que facilita a difusão do uso dos ensaios em regime oscilatório (ANDERSON et. al., 1991 apud FAXINA, 2006).

Segundo Faxina (2006), o estudo das características viscoelásticas dos ligantes, no regime de viscoelasticidade linear, representou o grande diferencial no avanço do entendimento do comportamento reológico desses materiais. Todo o desenvolvimento da especificação Superpave e de outras especificações baseadas em desempenho, para ligantes asfálticos, está embasado na caracterização dos materiais na faixa de viscoelasticidade linear. Nesta região, as propriedades reológicas variam pouco com os níveis de tensão ou de deformação e é aplicável o princípio de superposição tempo-temperatura.

Segundo Motta et. al. (1996), o SHRP com o objetivo de verificar as propriedades dos ligantes, selecionou quatro tipos de métodos de ensaio descritos sucintamente nos itens a seguir.

### 2.8.2 Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (Dynamic Shear Rheometer) - DSR

O reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) é usado para caracterizar as propriedades viscoelásticas do ligante. Este mede o módulo complexo de cisalhamento ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ), pequena quantidade de ligante é submetida a tensões cisalhantes oscilatórias entre duas placas (uma fixa e outra oscilatória).

A amostra é submetida a um torque e são medidas as deformações cisalhantes. Caso haja uma defasagem entre a tensão aplicada e a resposta à deformação cisalhante, o intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) representa o atraso na deformação obtida. Esta fase em atraso é expressa em medida angular, pelo tempo de atraso ( $\Delta t$ ) multiplicado pela frequência angular ( $w$ ):  $\delta = w \times \Delta t$  onde  $\delta$  é o ângulo de fase, conforme ilustram as Figuras 2.27 e 2.28.

Figura 2.27 : Ilustração do funcionamento do reômetro de cisalhamento dinâmico (ROHDE, 2007).

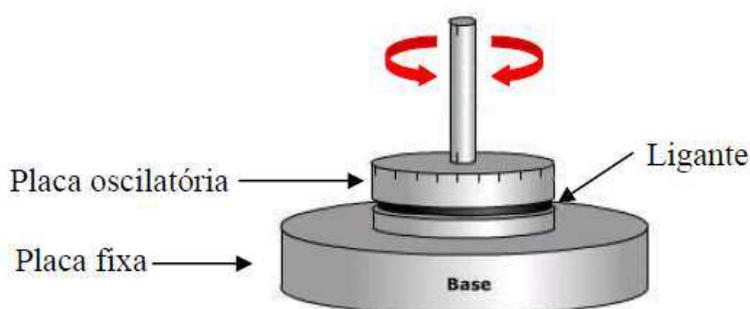
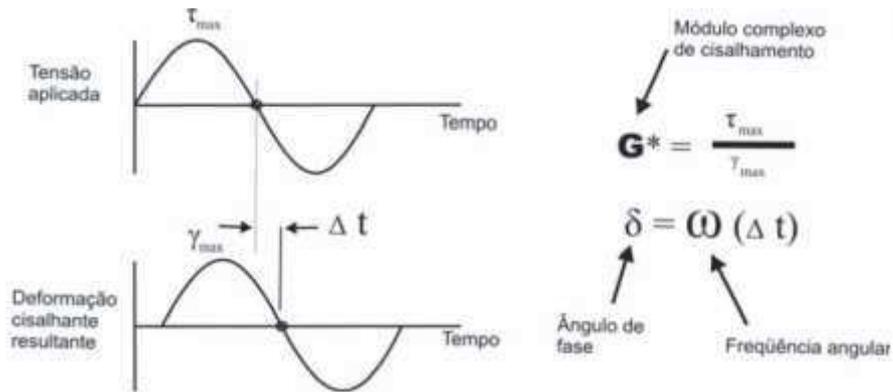


Figura 2.28 : Ilustração do funcionamento do reômetro de cisalhamento dinâmico (SOARES, 2007).



Uma amostra circular de material asfáltico de 1 a 2 mm de espessura é colocada entre dois pratos circulares paralelos, com 8 a 25 mm de diâmetro (essas dimensões não são mandatórias). O prato inferior é fixo e o superior oscila, com amplitudes geralmente menores que 1 grau. Segundo Kennedy et. al. (1994) a frequência adotada é igual a 10 rad/s, o que simula um tráfego a 100 km/h.

### 2.8.3 Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla - MSCR

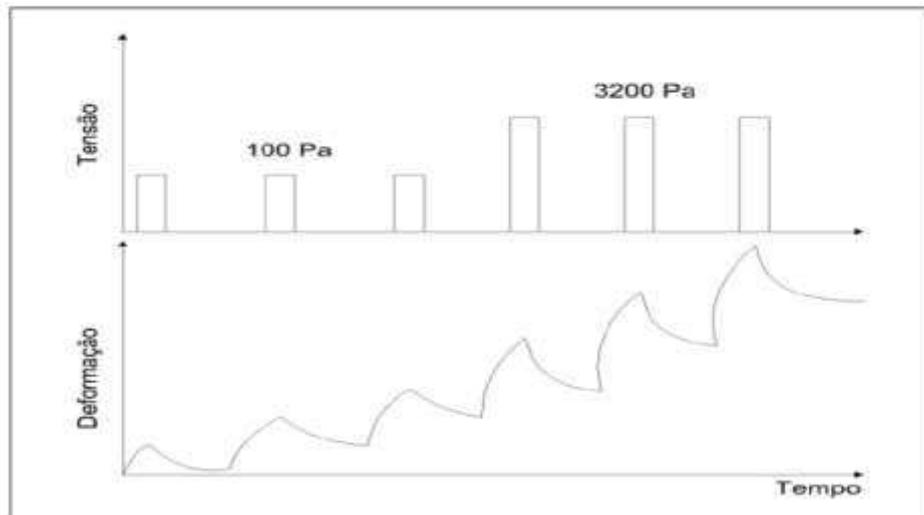
O ensaio MSCR foi desenvolvido pela Administração Rodoviária Federal dos Estados Unidos por meio de um aperfeiçoamento dos ensaios de fluência repetida e recuperação (RCRT), sendo uma alternativa ao ensaio do Superpave em regime oscilatório para a caracterização da resistência dos ligantes asfálticos à deformação permanente. No MSCR utiliza-se o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) para aplicar uma carga constante de 1 s em uma amostra de ligante asfáltico, removendo-a em seguida e permitindo que o material repouse por um período de tempo de 9 s. São utilizados dois níveis de tensão, uma de 100 Pa aplicada para os dez primeiros ciclos, simulando uma condição de tráfego normal, e uma segunda de 3200 Pa, que simula a ação do tráfego intenso, com o objetivo de avaliar a capacidade do material em manter sua resposta elástica (DOMINGOS, 2011; SOBREIRO, 2014).

Inicialmente, para avaliar a resistência dos ligantes asfálticos à deformação permanente, a especificação Superpave adotou o parâmetro  $G^*/\sin\delta$ . Esse parâmetro combina a resistência total do ligante asfáltico à deformação sob carregamento do tráfego, representado pelo  $G^*$  (módulo complexo de cisalhamento), e o ângulo de fase ( $\delta$ ) que representa a distribuição relativa da resposta total do ligante asfáltico entre um componente em fase e outro defasado. O componente em fase, conhecido como  $G'$ , representa o componente elástico, que pode ser relacionado com a quantidade de energia armazenada a cada ciclo de carregamento; enquanto o componente defasado ( $G''$ ) está relacionado à quantidade de energia dissipada em cada ciclo de carregamento, representando assim o comportamento viscoso. Dentro desse contexto, pode-se compreender que a contribuição do ligante asfáltico na resistência à deformação permanente da mistura asfáltica acontece mediante uma resistência total maior (valores superior de  $G^*$ ) ou de uma elasticidade maior (menores valores de  $\delta$ ) (BAHIA & ANDERSON, 1995).

Enquanto o  $G^*/\sin\delta$  é um parâmetro utilizado para determinar os efeitos viscosos e elásticos dos materiais, ele não foi adequado para avaliar os benefícios dos modificadores dos ligantes asfálticos, uma vez que o impacto no ângulo de fase foi pequeno em relação ao valor total do  $G^*/\sin\delta$  (Asphalt Institute, 2010). Delgadillo et. al., (2006) comentam que os testes realizados para avaliar a deformação permanente dos ligantes asfálticos eram realizados com baixas tensões, o que permitia a simplificação do ensaio. No entanto, os mesmos autores salientam que ao evitar testes em tensões mais altas o ligante asfáltico se comporta como um material viscoelástico no regime linear e a deformação se torna proporcional à tensão. Sendo assim, uma dúvida foi gerada com relação à caracterização da resistência à deformação permanente dos ligantes asfálticos com aplicação de baixas tensões, pois as tensões e deformações no ligante asfáltico podem ser superiores às do limite de comportamento linear, podendo alcançar o comportamento não-linear do material (DOMINGOS, 2011).

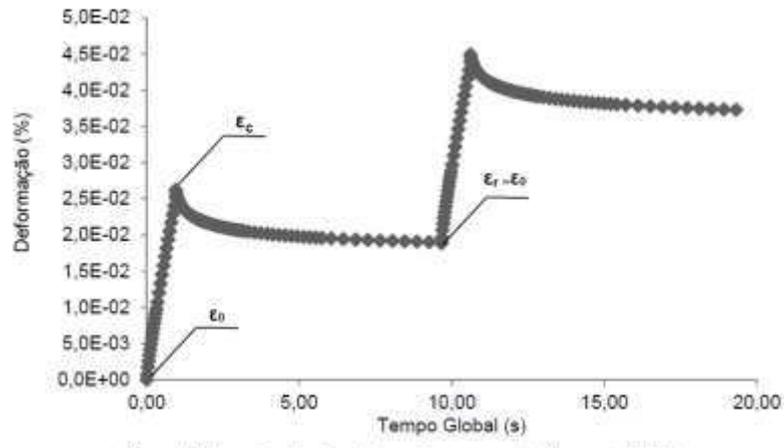
Na Figura 2.32 são apresentados os ciclos de aplicação de tensões e deformações durante a realização do ensaio de Fadiga com DSR.

Figura 2.29 : Ciclos de aplicação de tensões e deformações durante a realização do ensaio de MSCR com o DSR (José Júnior, 2015).



Segundo Domingos (2011), duas propriedades são obtidas no MSCR: o percentual de recuperação (R) e a compliância não-recuperável (Jnr). Ambas são determinadas por meio de três leituras de deformação na amostra de ligante asfáltico em cada um dos 10 ciclos de fluência e recuperação, sendo elas: (1) uma no início do ciclo de fluência ( $\epsilon_0$ ), medida no tempo de 0 s; (2) outra no final do ciclo de fluência ( $\epsilon_c$ ), medida no tempo de 1 s; e (3) outra no final do ciclo de recuperação ( $\epsilon_r$ ), medida no tempo de 10 s. A Figura 2.33 ilustra a localização destas deformações em um ciclo de fluência e recuperação.

Figura 2.30 : Localização das deformações em um ciclo do ensaio de MSCR. (SOBREIRO, 2014)



Os cálculos do percentual de recuperação e da compliância não-recuperável são realizados por meio de equações prescritas na norma ASTM D7405. No caso do percentual de recuperação, este cálculo é efetuado por meio da Equação 2.3:

$$R(\sigma, N) = \frac{[(\varepsilon_c - \varepsilon_0) - (\varepsilon_r - \varepsilon_0)] \times 100}{(\varepsilon_c - \varepsilon_0)} \quad (2.3)$$

onde  $R(\sigma, N)$  é o percentual de recuperação na tensão  $\sigma$  (para  $\sigma = 100$  Pa ou  $3.200$  Pa) para o ciclo de fluência e recuperação número  $N$  (onde  $1 \leq N \leq 10$ ). No caso da compliância não-recuperável este cálculo é efetuado por meio da Equação 2.4:

$$J_{nr} = \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_0}{\sigma} \quad (2.4)$$

onde  $J_{nr}(\sigma, N)$  é a compliância não-recuperável na tensão de  $\sigma$  Pa e no ciclo de fluência e recuperação número  $N$ , para  $\sigma$  e  $N$  apresentando os mesmos valores mencionados anteriormente ( $\sigma = 100$  ou  $3.200$  Pa e  $1 \leq N \leq 10$ ). De posse de todos os valores individuais de  $R(\sigma, N)$  e  $J_{nr}(\sigma, N)$  nos 10 ciclos de fluência e recuperação, seus resultados médios são calculados por meio da média aritmética simples dos valores obtidos nestes 10 ciclos (ANDERSON et. al., 2010), em cada uma das temperaturas de realização do ensaio de MSCR.

Sendo assim, a partir do estudo realizado com o MSCR surgiu uma nova classificação baseada nos valores limites de  $J_{nr}$  considerando materiais na condição envelhecida a curto prazo (RTFO) para diferentes níveis de carregamento de tráfego S (padrão), H (Pesado), V (muito pesado) e E (extremamente pesado), conforme apresentado na Tabela 2.14 (D'ANGELO, 2010).

Tabela 2.14 : Classificação quanto ao valor de Jnr de acordo com o critério proposto pelo FHWA. (AASHTO M320, 2010).

PROPRIEDADE	LIMITE MÁXIMO (kPa <sup>-1</sup> )	TIPO DE TRÁFEGO	NÚMERO DE PASSAS DE UM EIXO PADRÃO
Jnr a 3200 Pa na temperatura do PG	4,0	Padrão (S)	< 10 milhões
	2,0	Pesado (S)	> 10 milhões
	1,0	Muito Pesado (S)	< 30 milhões
	0,5	Extremamente Pesado (S)	> 100 milhões

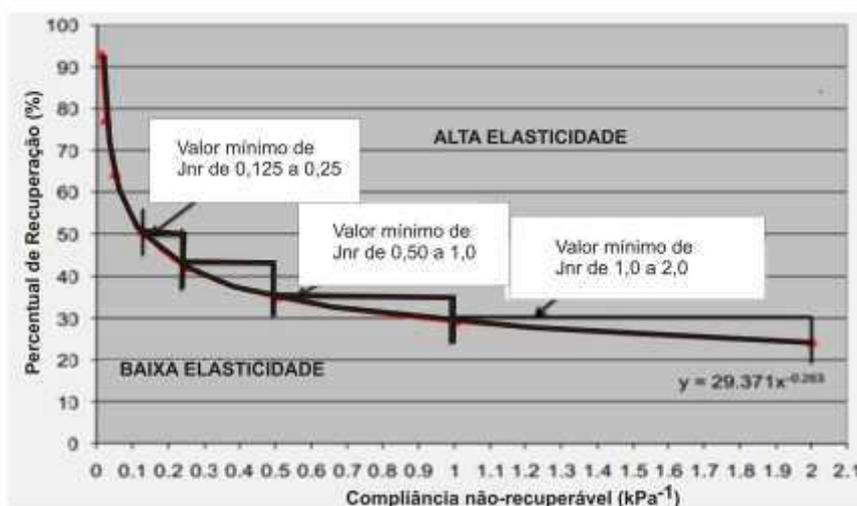
Valores mínimos do percentual de recuperação são recomendados para os ligantes asfálticos de acordo com o valor da compliância não-recuperável, conforme Tabela 2.15. Segundo o Asphalt Institute (2010), esse percentual fornece uma indicação da resposta elástica retardada do ligante asfáltico, sendo que valores elevados indicam uma componente elástica significativa no material na temperatura de realização do ensaio MSCR.

Tabela 2.15: Percentual de recuperação de acordo com o critério proposto pelo FHWA (D'Angelo, 2010)

Jnr a 3.200 Pa (kPa-1)	%R mínimo (%)
1,01 - 2,0	30
1,01 - 2,1	35
1,01 - 2,2	45
1,01 - 2,3	50

Os valores mínimos do percentual de recuperação também podem ser apresentados na forma gráfica, como mostrado na Figura 2.31. Os ligantes asfálticos com pares ordenados (Jnr, R) acima da curva são considerados de alta elasticidade e aqueles com pares ordenados (Jnr, R) abaixo da curva são considerados de baixa elasticidade. Para assegurar que o material não seja demasiadamente sensível a mudanças no nível de tensão, a relação entre as compliâncias não-recuperáveis a 100 Pa (Jnr100) e a 3.200 Pa (Jnr3200) não deve superar os 75% (SOBREIRO, 2014).

Figura 2.31 : Relação entre a compliância não-recuperável e o percentual de recuperação a 3200 Pa (HOUSSAIN, et. Al. 2015).

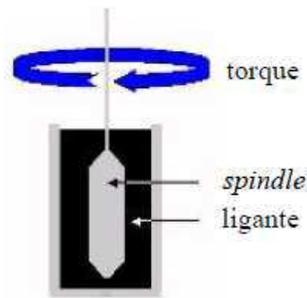


Segundo Pamplona (2013), a caracterização completa de um ligante asfáltico deveria compreender ensaios reológicos ao longo de toda a faixa de temperaturas ou de tempos de carregamento à qual o pavimento estaria submetido ao longo da sua vida de serviço. As curvas mestras são uma representação do comportamento reológico do material, em função da frequência (ou do tempo) de carregamento, empregando uma função reológica qualquer, para uma única temperatura, denominada temperatura de referência, em um espectro de frequências ou tempos de carregamento. O tempo e a temperatura têm efeitos que podem ser intercambiados, ou seja, um determinado aumento na temperatura é equivalente a uma determinada redução na frequência de carregamento. A separação dos efeitos do tempo e da temperatura caracteriza materiais cujo comportamento é denominado termorreologicamente simples. Ao analisar uma curva mestra o efeito da frequência alta é equivalente ao da temperatura baixa e o efeito da frequência baixa é equivalente ao da temperatura alta. Para a obtenção da curva mestra o ensaio é realizado em diversas temperaturas para um mesmo intervalo de frequência, escolhe-se então a temperatura de referência, geralmente 25 °C.

#### 2.8.4 Viscosímetro rotacional (Rotational Viscosimeter)

O viscosímetro rotacional é utilizado para avaliar a trabalhabilidade dos ligantes asfálticos em altas temperaturas. O equipamento mede a viscosidade por meio do torque necessário para rodar uma haste (spindle) imersa em uma amostra de asfalto quente, a velocidade constante, como ilustra a Figura 2.29. Geralmente, a caracterização da viscosidade do ligante é feita a 135°C, quando este age quase que inteiramente como um fluido viscoso. A medida da viscosidade busca assegurar que o ligante será suficientemente fluido para ser bombeado e misturado com os agregados. Segundo a especificação SUPERPAVE a viscosidade rotacional a 135°C deve ser inferior a 3 Pa.s (ASPHALT INSTITUTE, 1994).

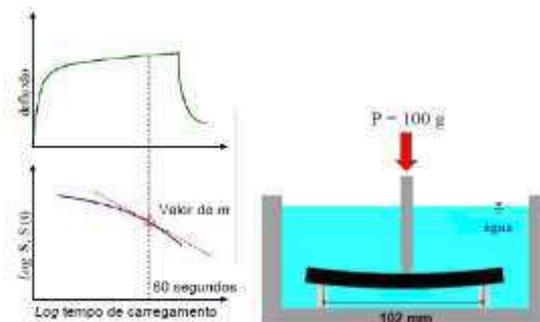
Figura 2.32 : Esquema de funcionamento do viscosímetro rotacional (ROHDE , 2007).



### 2.8.5 Reômetro de viga à flexão (Bending Beam Rheometer - BBR)

O reômetro de viga à flexão (BBR) é utilizado para caracterizar a rigidez do ligante asfáltico à baixa temperatura. O equipamento mede a deflexão produzida quando uma carga é aplicada no ponto médio de uma viga de ligante asfáltico simplesmente apoiada, durante 240 segundos, como ilustra a Figura 2.30. No ensaio são utilizados ligantes submetidos ao envelhecimento de longo prazo (PAV). A viga a ser ensaiada é colocada em um banho com temperatura controlada, determinada em função do clima da região onde será construído o pavimento. A carga de ensaio e a deflexão no ponto médio da viga são monitoradas ao longo do tempo. A rigidez  $S$  (creep stiffness) e o módulo de relaxação  $m$  (creep rate) são calculados a partir da resposta ao carregamento aplicado (ROHDE, 2007).

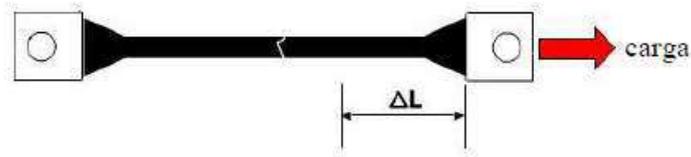
Figura 2.33 : Esquema do ensaio com o reômetro de viga à flexão para ligantes asfálticos. (ROHDE, 2007).



### 2.8.6 Prensa de tração direta (DTT – Direct Tension Test)

Alguns ligantes podem exibir rigidez a baixa temperatura maior do que o desejado e, mesmo assim, podem não apresentar trincamento, devido à capacidade de deformar sem se romper. O ensaio de tração direta (DTT) avalia a ductilidade do ligante a baixas temperaturas e consiste em estirar uma amostra de ligante, em temperatura controlada, até seu rompimento, como ilustra a Figura 2.31. A deformação na ruptura deverá ser maior ou igual a 1%. No ensaio são utilizadas amostras submetidas ao envelhecimento de longo prazo (PAV).

Figura 2.34 : Ilustração do ensaio de tração direta (ROHDE, 2007).



## 2.9 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier - FTIR

Segundo Fernandes (2007), a espectroscopia vibracional no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) é uma ferramenta poderosa na determinação de grupos funcionais e nos estudos de conformação e estrutura de macromoléculas. Ela também permite a obtenção do espectro vibracional completo da molécula. Esta técnica estuda a interação da radiação eletromagnética na região do infravermelho com a matéria, estudando a transição das vibrações normais moleculares.

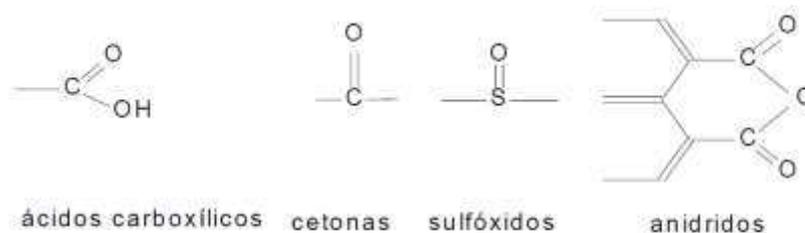
Essa técnica é uma ferramenta útil para o estudo de grupamentos característicos do ligante asfáltico, destacando os grupamentos alifáticos, aromáticos e heteroátomos, com bandas bem características para esses compostos, que fazem parte da composição química do ligante asfáltico, também se mostra satisfatória no estudo dos grupamentos que se formam ou se alteram durante um processo oxidativo (PETERSEN et. al., 1993).

Vários pesquisadores utilizaram a técnica de infravermelho para mostrar que compostos carboxílicos são produtos decorrentes da oxidação de ligantes asfálticos, embora existam controvérsias sobre os grupos funcionais predominantes (cetonas, anidridos, ésteres ou ácidos carboxílicos) (MASSON et. al., 2001; PETERSEN et. al., 1993; SILVA, 2005; BRINGEL, 2007; FERNANDES, 2007).

Os ligantes asfálticos apresentaram mudanças nas suas características físicas e químicas quando submetidos a processos termo-oxidativos causados pela perda de voláteis ou espécies de baixo peso molecular, além da formação de ligações de hidrogênio decorrentes do processo degradativo.

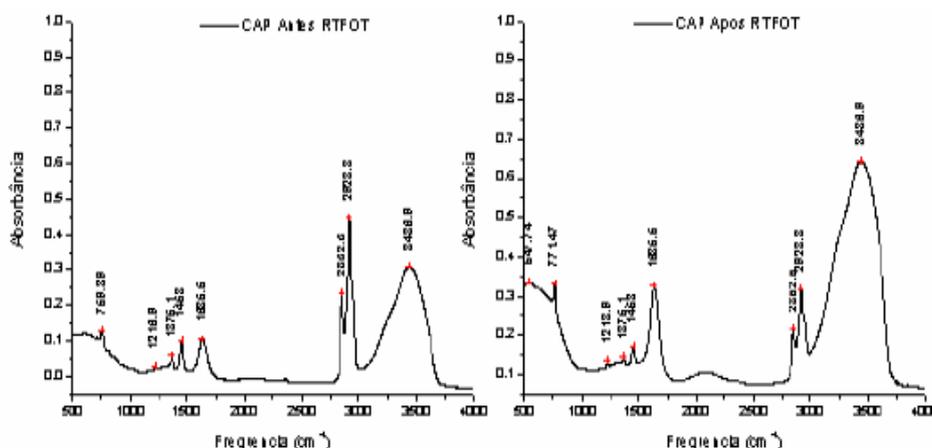
A Figura 2.35 mostra os grupos usualmente formados nos ligantes asfálticos após envelhecimento (MASSON et. al., 2001 apud LUCENA, 2005).

Figura 2.35 : Tipos de produtos de oxidação formados durante o envelhecimento do asfalto (LUCENA, 2005)



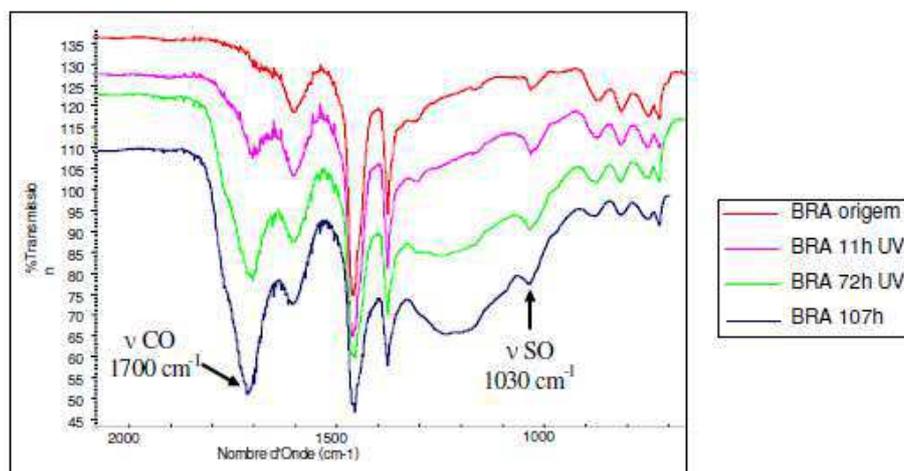
A seguir apresentam-se alguns resultados de pesquisas com auxílio de espectros no infravermelho para caracterização do CAP puro, CAP com polímero, do óleo de Mamona e óleo de Linhaça natural e oxidado. Na Figura 2.36 constam espectros típicos do CAP 50/70, em destaque, após o RTFO para o aumento da banda em torno de  $1700\text{ cm}^{-1}$  características de agrupamento de ácidos carboxílicos ( $\text{C}=\text{O}$ ) originário do processo de oxidação e diminuição do grupamento alifático ( $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}_3$ ) bandas em torno de  $1458\text{ cm}^{-1}$  (ARAÚJO, 2007).

Figura 2.36 : Espectros de absorção na região do infravermelho de amostras CAP antes e após o teste de RTFO, região  $400\text{-}4000\text{cm}^{-1}$  Baseline: Linear. Filme de  $\text{CHCl}_3$  (ARAÚJO, 2007).



Na Figura 2.37 podemos observar o efeito de diferentes tempos de exposição do CAP 50/70 (BRA) à radiação ultravioleta - UV, constatando-se que a evolução se traduz por um aumento das bandas de absorção das duas funções oxidadas, carbonila (em  $1700\text{ cm}^{-1}$ ) e sulfóxido (em  $1030\text{ cm}^{-1}$ ), acompanhada pela aparição de uma banda alargada entre  $1100$  e  $1300\text{ cm}^{-1}$  que tende a mascarar a banda de absorção da função sulfóxido. Acredita-se que esta banda represente a ligação  $\text{C}-\text{O}$  de ésteres formados durante a oxidação do ligante asfáltico (SILVA, 2005).

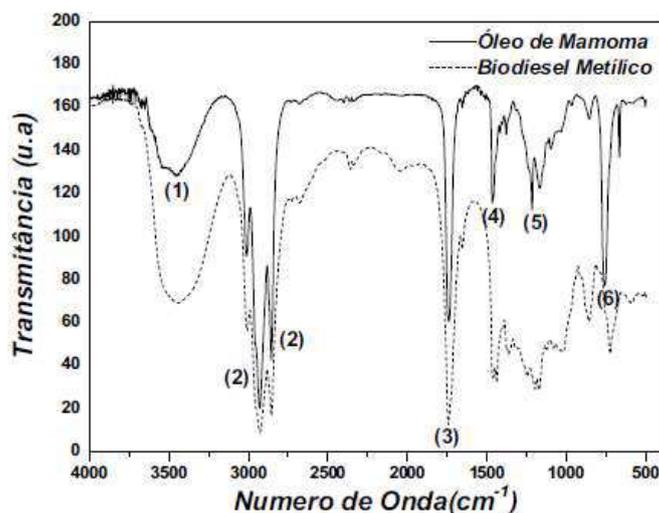
Figura 2.37 : Espectro FTIR do CAP 50/70 em diferentes tempos de exposição UV (SILVA, 2005).



Com relação ao óleo de mamona na Figura 2.38 consta o espectro infravermelho típico desse vegetal com auxílio do reconhecimento das bandas de absorção características dos principais grupos funcionais presentes no triglicerídeo. A numeração de 1 a 6 são absorções correspondentes do espectro do óleo de mamona a seguir descritas:

- (1)  $3450\text{ cm}^{-1}$  (banda larga) – Deformação axial da ligação O-H da hidroxila. Essa banda é característica do óleo de mamona.
- (2) Entre  $2928 - 2853\text{ cm}^{-1}$  – Deformação axial da ligação H-C (saturado).
- (3)  $1745\text{ cm}^{-1}$  – Deformação axial da ligação dupla C=O.
- (4)  $1460\text{ cm}^{-1}$  – Deformação angular do grupo  $\text{CH}_2$ .
- (5)  $1220\text{ cm}^{-1}$  – Deformação angular de C-C(=O)-O.
- (6)  $754\text{ cm}^{-1}$  – Deformações fora do plano do  $\text{CH}_2$ .

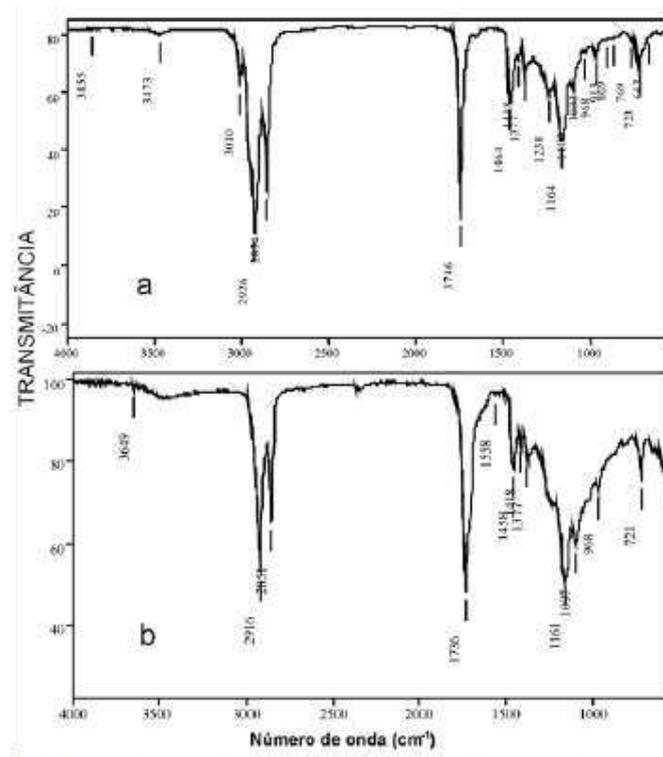
Figura 2.38 : Espectro do infravermelho do óleo de Mamona e do biodiesel metílico (GALVÃO, 2007).



Para o óleo de Linhaça natural, observa-se na Figura 2.39, (FONSECA & YOSHIDA, 2009) uma proeminente banda de estiramento de carbonila em  $1746\text{ cm}^{-1}$  e das vibrações da ligação C–O em  $1238$ ,  $1164$  e  $1100\text{ cm}^{-1}$  são diagnósticos para a ligação éster no triacilglicerol. A banda de baixa intensidade em  $3010\text{ cm}^{-1}$  é atribuída ao estiramento C–H de duplas não conjugadas, simetricamente dissubstituída em posição cis. Essa atribuição é apoiada na banda da deformação CH fora do plano em  $723\text{ cm}^{-1}$  e no estiramento da estrutura cis ( $-\text{CH}=\text{CH}-$ ) em  $1654\text{ cm}^{-1}$ . A ausência de banda intensa proveniente da deformação de CH na região de  $1000 - 800\text{ cm}^{-1}$  ou vibrações de estiramento em  $1680 - 1600\text{ cm}^{-1}$  também pode ser utilizada para evidenciar essa vibração. A banda de baixa intensidade que aparece em  $969\text{ cm}^{-1}$  pode ser atribuída à deformação da dupla ligação não conjugada dissubstituída simetricamente em posição trans (MEILUNAS, 1990 apud FONSECA & YOSHIDA, 2009).

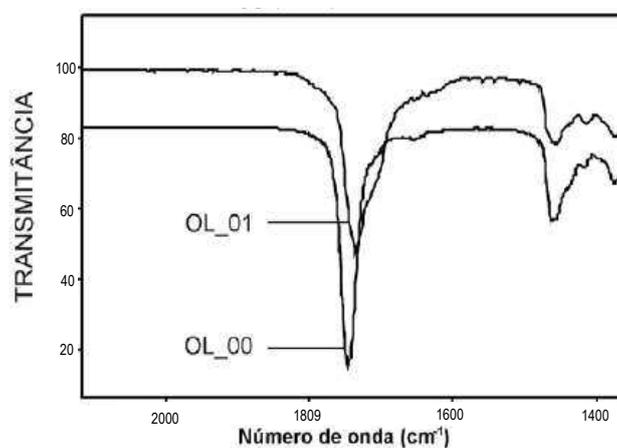
Em  $1464$  e  $1377\text{ cm}^{-1}$ , aproximadamente, observa-se a banda de deformação axial dos grupos C–H alifáticos de intensidade apreciável.

Figura 2.39: Espectros Vibracionais no Infravermelho do (a) óleo de linhaça natural (OL\_00) e (b) filme do óleo de linhaça em processo de cura (OL\_01) (FONSECA & YOSHIDA, 2009)



O processo de envelhecimento, caracterizado pela oxidação da amostra, provoca alterações na matriz que são evidenciadas no espectro de absorção no infravermelho da amostra OL\_01, conforme apresentado na Figura 2.40. Das alterações observadas a mais significativa se deve ao alargamento da banda de absorção do grupo carbonila (C=O), melhor visualizado na Figura 2.40. O alargamento está atribuído à presença de compostos oxidados, como aldeídos, cetonas, ácidos carboxílicos e outros formados nas etapas de propagação mostrada na Figura 2.41 e favorecida pela degradação dos hidroperóxidos (FONSECA & YOSHIDA, 2009).

Figura 2.40 : Banda de absorção no infravermelho da banda C=O do óleo de linhaça natural (OL\_00) e do filme oxidado (OL\_01) (GALVÃO, 2007).

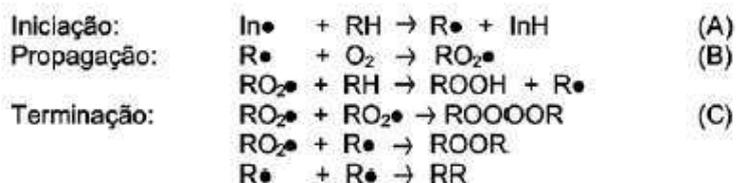


O ombro exibido em, aproximadamente, 1715  $\text{cm}^{-1}$  e a deformação axial posicionada em torno de 1418  $\text{cm}^{-1}$  são características da formação de ácidos carboxílicos no filme envelhecido do óleo de linhaça. Porém, a deformação de C=O de outras classes de compostos carbonílicos (cetonas, aldeídos, etc.), que possivelmente sejam formadas, podem provocar a superposição destas bandas de absorção. Porém, a evidência de formação de ácidos carboxílicos pode ser sustentada pela banda alargada na região 3300  $\text{cm}^{-1}$  e 2500  $\text{cm}^{-1}$  (FONSECA & YOSHIDA, 2009).

Outra consideração importante consiste no deslocamento do máximo da banda de C=O para frequências mais baixas, devido às modificações químicas ocorridas na matriz que, por efeito mesomérico, alteram as características eletrônicas na vizinhança deste grupamento. Assim, o caráter de ligação dupla no grupo C=O e o valor da constante de força da ligação (lei de Hooke) são reduzidos alterando a frequência de vibração deste grupamento (FONSECA & YOSHIDA, 2009).

A perda de ligações duplas, comprovada pela ausência do pico em 3010  $\text{cm}^{-1}$  e pela diminuição na intensidade das bandas de CH<sub>2</sub> em 2926  $\text{cm}^{-1}$ , 2854  $\text{cm}^{-1}$  e 723  $\text{cm}^{-1}$ , são características relacionadas ao processo de oxidação do óleo de linhaça (FONSECA & YOSHIDA, 2009).

Figura 2.41 : Etapas envolvidas no processo de auto-oxidação do óleo de Linhaça (FONSECA & YOSHIDA, 2009).

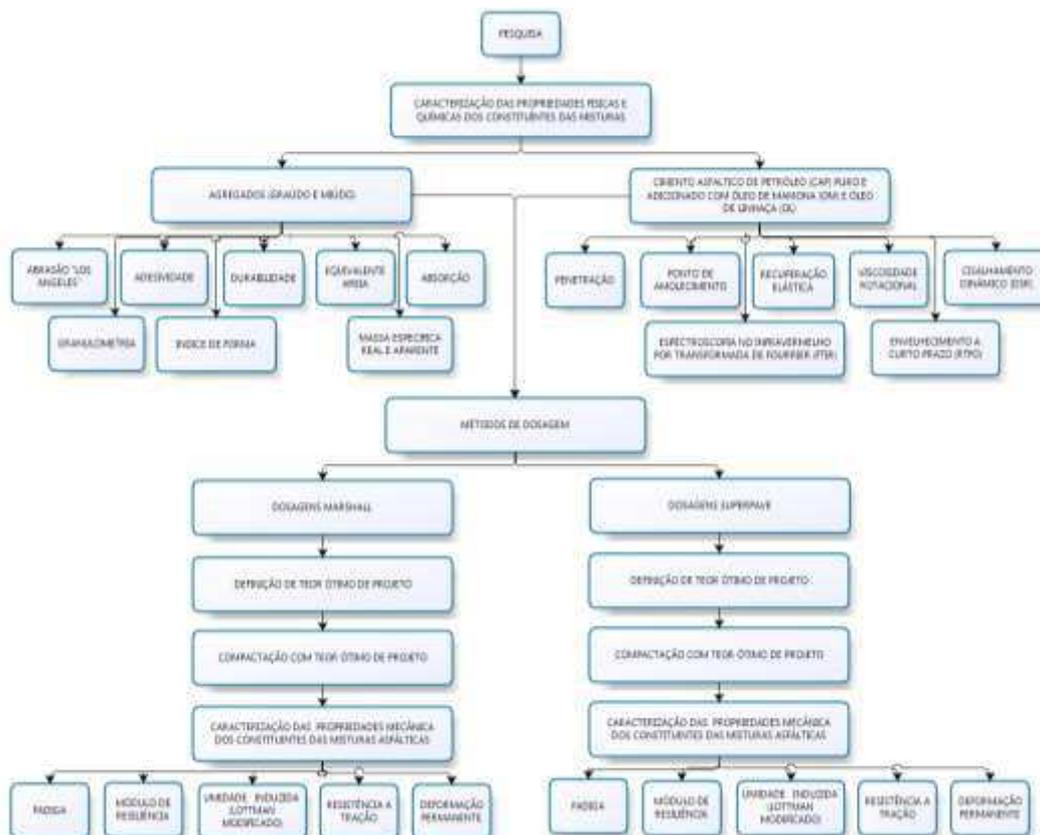


A reação de oxidação inicia-se com a formação de radicais livres (R•), seguida da formação de hidroperóxidos. Estes compostos são instáveis e possibilitam a continuidade do processo com as reações de propagação por meio da fragmentação, rearranjo, transferência de átomos ou grupos e de processo de ciclização na matriz. Os hidroperóxidos são os principais intermediários no mecanismo de cura (oxidação) do óleo e sua decomposição se dá por diferentes mecanismos produzindo compostos carbonílicos como cetonas, aldeídos, ácidos carboxílicos, além de alcoóis, éter e outros compostos orgânicos (SAILER, 1998 apud FONSECA & YOSHIDA, 2009).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os materiais, métodos e especificações empregadas na presente pesquisa. Além disso, os procedimentos para a coleta e caracterização dos materiais, dosagem das misturas asfálticas pelos métodos Marshall e Superpave, ensaios reológicos e ensaios mecânicos. A Figura 3.1 ilustra a sequência de atividades referente aos procedimentos da pesquisa.

Figura 3.1 : Sequência de procedimentos das dosagens.



#### 3.1 Seleção dos Materiais

No presente subitem são apresentados os tipos de materiais utilizados e suas origens, como também, os critérios escolhidos para a seleção que foi subsidiada pelas recomendações preconizadas pelas normas vigentes do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Federal Highway Administration - FHWA e American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO.

Os métodos não constantes nas normas foram descritos em suas particularidades. Os materiais utilizados foram o ligante convencional (CAP 50/70), modificado por polímero SBS (CAP 55/75-E), óleo de Mamona, óleo de Linhaça, cal hidratada como filer e os agregados para compor as misturas asfálticas.

### 3.1.1 Agregados

Os agregados, tipo graníticos, utilizados são oriundos da Pedreira Guarani, localizada no km 85,6 da rodovia BR-101/PE, na Região Metropolitana da Cidade do Recife e os ensaios a serem realizados com os agregados constam na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Caracterização dos agregados graúdos e miúdos.

<b>ENSAIO</b>	<b>MÉTODO</b>
Análise granulométrica por peneiramento	DNIT – ME 083/98
Massa específica real e absorção 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
Adesividade	DNIT – ME 078/98
Durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio.	DNIT – ME 089/94
Índice de forma	DNIT – ME 086/94

Para todas as misturas foi utilizada a cal hidratada tipo CH-I como fíler artificial. A cal foi fornecida pela Indústria e Comércio Megao Ltda, localizada em Surubim/PE. Na Tabela 3.2 consta a composição química da cal, fornecida pelo fabricante e na Figura 3.2 a foto da cal utilizada.

Tabela 3.2 : Composição química da cal hidratada (Fonte: CAGEL Ltda).

<b>Composto</b>	<b>Quantidade (%)</b>
Perda por calcinação	23,0 – 25,0
Ca (OH) <sub>2</sub>	92,5 – 98,5
MgO	3,5 (máx.)
Resíduo insolúvel em HCl	0,5 (máx.)
SiO <sub>2</sub>	0,3 (máx)
R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5 (máx)

Figura 3.2 : Foto da cal hidratada.



### 3.1.2 Cimento Asfáltico de Petróleo

Os ligantes CAP 50/70 e CAP 55/75-E modificado com polímero foram obtidos da distribuidora Stratura Asfaltos S/A (antiga Ipiranga Asfaltos S/A). Para o CAP com polímero a nomenclatura utilizada na presente pesquisa constante nas análises realizada no Capítulo 4 foi CAP 50/75 sem a letra E de elastomérico. Na tabela 3.3 constam as normas que foram utilizadas para caracterização dos ligantes.

Tabela 3.3 : Composição química da cal hidratada (Fonte: CAGEL Ltda).

ENSAIOS	NORMAS
Penetração	DNIT-ME 155/2010
Viscosidade Rotacional	NBR 15184/07
Recuperação Elástica	DNIT-ME 130/2010
Ponto de Amolecimento	DNIT-ME 131/2010
RTFO	NBR 15235
Estabilidade a estocagem	NBR 15166/2004
<b>ENSAIOS REOLÓGICOS NO DSR</b>	
Determinação das propriedades reológicas	D7175 – 08
Determinação do grau de desempenho (PG)	ASTM D6373 - 15
Ensaio de fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR)	ASTM D7405-10a

### 3.1.3 Aditivos

Os óleos vegetais utilizados foram os óleos de Mamona e de Linhaça, que são óleos antioxidantes, com propriedades tensoativas e de fácil mistura. O óleo de Mamona (*Ricinus communis* L) foi obtido no Laboratório de Química Orgânica da Universidade Federal de Campina Grande, cujas características estão contidas na Tabela 3.4 e ilustrado na Figura 3.3.

Tabela 3.4 : Características físico-química do óleo de Mamona (SOUZA, 2012).

Tipo de óleo	VARIABLES					
	Teor de agua	Índice de acidez (Mg K OH/g)	Índice de iodo (g i/100g)	Índice de peroxido (meq/100g)	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

Figura 3.3 : Foto do Óleo de Mamona.



Na Figura 3.4 consta a foto do óleo de linhaça que foi obtido no Mundo dos Óleos e suas físico-químicas estão apresentadas na Figura 3.5.

Figura 3.4 : Foto do óleo de Linhaça.



Figura 3.5 : Características físico-químicas do óleo de Linhaça.



## Óleo de Linhaça

<b>Nome científico</b>	<i>Linum usitatissimum</i> – <i>Linaceas</i> ( <i>Linum Oil</i> )
<b>Procedência</b>	Produto de fabricação nacional ( <i>Made in Brazil</i> )
<b>Forma de obtenção</b>	Prensagem a frio e filtração ( <i>Cold press and filtration</i> )
<b>CAS / EINECS</b>	8001-26-1 / 232-278-6
<b>Parte utilizada</b>	Semente

### CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS

Característica	Especificação	Resultado	Metodologia
Cor (25°C)	Amarelo	De acordo	Propriedades Organolépticas
Densidade (25°C g/ml)	0,910 – 0,920	0,917	*IAL 337/IV
Estado Físico (25°C)	Líquido viscoso	De acordo	Propriedades Organolépticas
Índice de Acidez (mg KOH/g)	< 2,0	0,89	*IAL 325/IV
Índice de Iodo (Wijs)	100 – 140	139,59	*IAL 329/IV
Índice de Peróxido (meq/kg)	< 10	0,80	*IAL 326/IV
Índice de Refração (n <sub>D</sub> 40°C)	1,4650 – 1,4850	1,4708	*IAL 327/IV
Índice de Saponificação (mg KOH/kg)	158 - 198	175,51	*IAL 328/IV
Odor (25°C)	Característico	De acordo	Propriedades Organolépticas

\* Metodologia - Instituto Adolfo Lutz

### CONTAGEM MICROBIANA

Característica	Especificação *	Resultado
Bactérias totais – 1.000 UFC/g	<10 <sup>3</sup> UFC/g	De acordo
Fungos e leveduras – 100 UFC/g	<10 <sup>2</sup> UFC/g	De acordo
Coliformes totais	Ausente	De acordo
E.Coli	Ausente	De acordo
Staphylococcus Aureus	Ausente	De acordo
Pseudomonas SP	Ausente	De acordo

\* Metodologia - Farmacopéia Brasileira

LOTE: LIN 079/389

DATA DE FABRICAÇÃO: 25/11/2011

DATA DE VALIDADE: 18 meses após a data de fabricação em embalagens lacradas.

Conservar em local seco e arejado, temperatura máxima 25°C não expor este produto ao calor nem a raios solares.

PRINCIPAIS APLICAÇÕES: Uso alimentício, cosmético, farmacêutico.

Liberado por:  ROBERTO HÜBNER Chefe de Produção	Analisado por:  PAULA A. VIEGARI CPF: 50266 Controle de Qualidade	Aprovado por:  RENATO YAMAMOTO CPF: 64416 Responsável Técnico
---	--	--

As informações aqui contidas são fornecidas de boa fé. Recomendamos que nossos produtos sejam testados para verificar a conveniência de seu uso antes de adotá-los industrialmente. Estas informações não devem ser entendidas como permissão para utilização de métodos ou composição cobertas por qualquer patentes.

Tel: (011) 5026-1447 / 5032-5500 / 0460-0952 - Visite nosso site: <http://www.mundodosoleos.com.br> ou e-mail: [contato@mundodosoleos.com.br](mailto:contato@mundodosoleos.com.br)

### 3.2 Produção dos Ligantes Asfálticos

Com base em análises de estudos realizados que visaram avaliar o comportamento de amostras de CAP associadas a compostos, Souza (2012) e Faxina (2006) determinaram os melhores parâmetros para a realização das misturas entre os CAPS e os óleos. Para a produção das misturas foi utilizado o misturador da marca Fisaton modelo 722D de cisalhamento (Figura 3.6), o qual impõe movimentos giratórios a misturas através de uma hélice de 10 cm de diâmetro. O equipamento indica a velocidade de rotação e temperatura em dispositivo digital. A Figura 3.7 expõe a sequência realizada para produção das misturas e suas condições de execução.

Figura 3.6 : Misturador mecânico com controladores de temperatura e rotações UAEMA/UFMG.

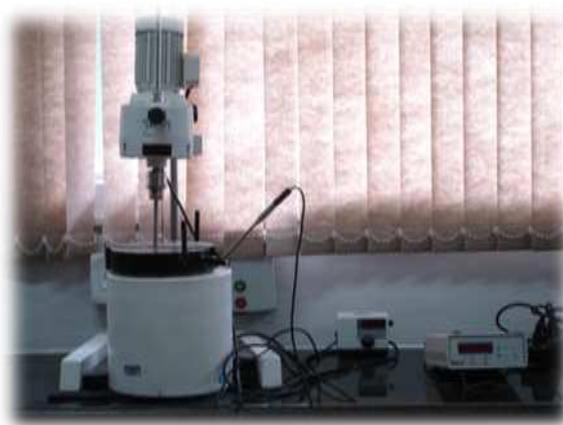


Figura 3.7 : Sequência de misturas.



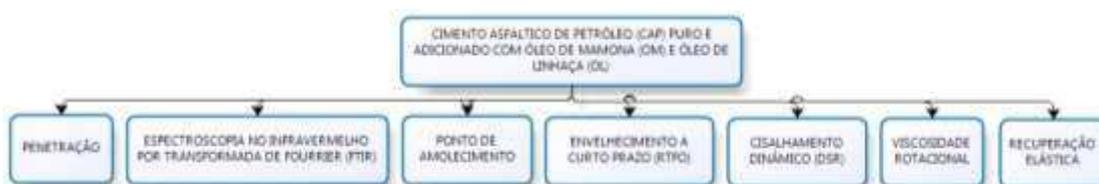
As misturas foram realizadas adotando as seguintes etapas: o CAP foi aquecido em estufa a uma temperatura de aproximadamente 120°C, por um período de aproximadamente uma hora e meia, para garantir a fluidez do material. Em seguida, o CAP foi colocado em um béquer e inserido na manta do misturador mecânico. A manta foi acionada à temperatura de mistura, de 135°C, e o misturador foi acionado para garantir a homogeneidade da temperatura na amostra (essa rotação foi a mesma da rotação de mistura, de aproximadamente 406 rpm). Quando atingida a temperatura de mistura, os percentuais relativos aos óleos de Mamona e de Linhaça foram adicionados. O óleo foi levemente

aquecido previamente para evitar problemas de diferença de temperatura. Após a estabilização dos parâmetros de rotação e temperatura foi contabilizado um intervalo de 20 minutos para homogeneização e encerrada a fase de mistura, sendo a mistura armazenada (em recipientes limpos e secos) e estocada posteriormente. Sequencialmente determinaram-se os percentuais de 4%, 5% e 6% de óleo de Mamona e óleo de Linhaça para as amostras iniciais, em relação à massa da amostra total.

### 3.3 Caracterização dos ligantes asfálticos puro e com aditivos.

A Figura 3.8 ilustra a sequência de ensaios utilizados para a caracterização do CAP. Para cada um dos ensaios realizados foi obtida a média a partir de três amostras ensaiadas.

Figura 3.8 : Ssequência de atividades para a caracterização do CAP.



#### 3.3.1 Estabilidade à Estocagem

O ensaio de estabilidade à estocagem permite avaliar a compatibilidade entre o polímero e o CAP durante a estocagem. Esse ensaio é normatizado pela DNIT-ME 384/99. O ensaio consistiu, basicamente, em aquecer a amostra de asfalto modificado a 130°C até se tornar líquida. Depois, a amostra foi colocada em recipiente até completar os 250 mL. Em seguida, fechou-se o recipiente e foi colocado na estufa a 163°C por cinco dias. Após este período foi removido 25 mL de asfalto do topo e do fundo do recipiente. Por fim, foram realizados ensaios de ponto de amolecimento (anel e bola) das amostras retiradas do topo e do fundo do recipiente.

#### 3.3.2 Envelhecimento a Curto Prazo – RTFO

O envelhecimento que ocorre durante a estocagem, usinagem e aplicação é chamado de envelhecimento de curto prazo e é afetado principalmente pela temperatura e pelo grau de exposição do ligante ao oxigênio.

O procedimento Rolling Thin Film Oven - RTFO (ASTM D2872) simula o envelhecimento nessas condições. O procedimento é feito colocando-se uma quantidade específica de cimento asfáltico (35g) numa jarra, que gira dentro de uma estufa a 163°C. Por intermédio de um orifício aberto na jarra, uma corrente de ar atinge a mistura a cada rotação da placa rotativa com as jarras.

O procedimento dura 85 minutos. Após a realização desse procedimento as amostras são submetidas à verificação de perda de massa e nova caracterização, sendo avaliados o novo ponto de amolecimento, a

nova penetração, a nova viscosidade e a nova recuperação elástica. A Figura 3.9 demonstra o equipamento que foi utilizado para a realização desse procedimento.

Figura 3.9 : Equipamento de RTFO.

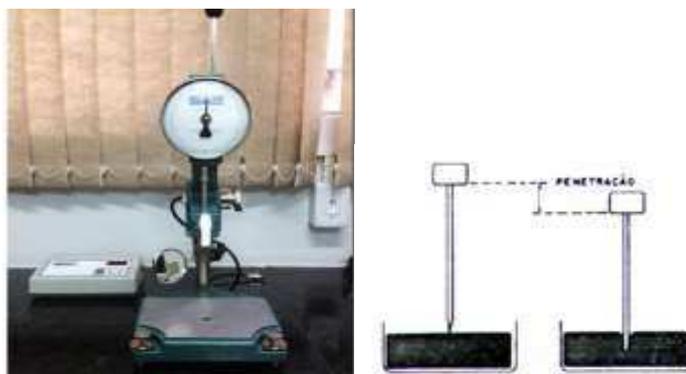


### 3.3.3 Ensaio de Penetração

Tida como forma classificatória do cimento asfáltico de pavimentação, o ensaio de penetração foi realizado conforme o preconizado na norma DNIT-ME 155/2010. Define-se penetração como sendo a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha padrão penetra verticalmente em uma amostra de cimento asfáltico de pavimentação sob condições predeterminadas de carga, tempo e temperatura.

O ensaio de penetração mede a “consistência” ou “viscosidade indireta” do CAP no estado semissólido. O ensaio consistiu basicamente em determinar a profundidade, em décimos de milímetros, que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra verticalmente, durante 5 segundos, em uma amostra de CAP a uma temperatura de 25°C. Em cada ensaio foram realizadas três medidas individuais de penetração, com a adoção da média destes valores, na condição da dispersão entre as três medidas não exceder os valores especificados na norma. Na Figura 3.10 é mostrado o Penetrômetro utilizado para a realização deste ensaio.

Figura 3.10 : Penetrômetro automático (LEP/UFGC).



Também foi analisada a penetração retida – PR dos ligantes asfálticos que é calculada pela razão entre a penetração do ligante asfáltico na condição envelhecida a curto prazo mediante o procedimento RTFO ( $PEN_{RTFO}$ ) e a penetração do mesmo material na condição puro ( $PEN_{puro}$ ), conforme mostrado na Equação 3.1.

$$PR = \frac{PEN_{RTFO}}{PEN_{puro}} \times 100 \quad (3.1)$$

Os baixos valores de penetração retida são um indicativo de uma maior sensibilidade ao envelhecimento. Os percentuais mínimos preconizados em norma para a penetração retida são 55% (DNIT 095/2006 – EM) para ligante convencional e 60% (DNIT 129/2011-EM) para o ligante com polímero.

Sobreiro (2013) utilizou o grau de modificação - GM para a avaliação dos resultados dos ensaios de penetração e ponto de amolecimento. O GM consiste na razão entre o valor da propriedade avaliada do material modificado ( $PEN_{mod}$ ) e o valor da propriedade para o material puro ( $PEN_{puro}$ ), conforme Equação 3.2. Valores acima da unidade ( $GM > 1$ ) indicam um aumento da propriedade para o ligante modificado quando comparado ao ligante puro, enquanto os valores inferiores à unidade ( $GM < 1$ ) sinalizam uma redução da propriedade para o material modificado em relação ao ligante asfáltico puro.

$$GM = \frac{PEN_{mod}}{PEN_{puro}} \times 100 \quad (3.2)$$

### 3.3.4 Ensaio de Ponto de Amolecimento

No Brasil o método mais utilizado para obtenção deste parâmetro do cimento asfáltico é o método conhecido como “anel e bola”, Figura 3.11.

Figura 3.11 : Aparato para ensaio ponto de amolecimento, método anel e bola.



O ponto de amolecimento do asfalto foi determinado conforme a norma DNIT ME 131/2012. Neste teste a amostra é fundida e colocada em um molde que consiste de um anel de latão. O anel contendo a amostra é mantido suspenso em um banho de água destilada, a temperatura controlada, e sobre ele é colocada

uma esfera padronizada de aço. O conjunto é aquecido a uma velocidade constante fazendo com que a amostra amoleça dentro do anel e ceda ao peso da bola que se deslocará a uma determinada distância. O ponto de amolecimento (PA) é a temperatura lida no momento em que a esfera metálica atravessa o anel perfeitamente cheio de material betuminoso e toca uma placa de referência após ter percorrido uma distância de 25,4 mm.

O aumento do ponto de amolecimento – APA foi determinado pela diferença entre o ponto de amolecimento dos ligantes asfálticos na condição envelhecida a curto prazo ( $PA_{RTFO}$ ) e o ponto de amolecimento do material na condição puro ( $PA_{puro}$ ), conforme Equação 3.3. Os altos valores de APA indicam uma maior sensibilidade do ligante asfáltico ao envelhecimento a curto prazo. O aumento máximo de 8°C (DNIT 095/2006 – EM) é o preconizado para o CAP 50/70 e o intervalo de -5°C a 7°C para o CAP 55/75 (DNIT 129/2011-EM). As avaliações do ponto de amolecimento também foram realizadas considerando o grau de modificação obtido pela Equação 3.4.

$$APA = PA_{mod} - PA_{puro} \quad (3.3)$$

$$GM = \frac{PA_{mod}}{PA_{puro}} \times 100 \quad (3.4)$$

### 3.3.5 Recuperação Elástica

A recuperação elástica é a medida da capacidade de retorno do sistema asfalto-polímero após a interrupção de tração mecânica exercida. O ensaio de recuperação elástica utiliza-se de um ductilômetro (Figura 3.12 (a)) com moldes modificados (Figura 3.12 (b)). O ensaio é realizado imerso em solução aquosa a uma temperatura de 25°C.

Após a estabilização da amostra em “banho maria” na temperatura do ensaio, a amostra sofre um estiramento sobre uma velocidade constante de 5 cm/min, que tem como intuito permitir uma movimentação adequada das partículas dos polímeros envolvidos na amostra.

Interrompe-se o ensaio após atingir 20 cm de estiramento e secciona-se a amostra de ligante, em seu ponto médio, observando-se ao final de 60 minutos, o quanto houve de retorno das partes ao tamanho original, medindo-se o novo comprimento apresentado pela amostra.

Com os valores de máximo estiramento e o valor após a restituição, obtém-se o valor da recuperação elástica da amostra ensaiada, comparando com os valores especificados em norma. A norma utilizada para a realização desse ensaio foi a DNIT-ME 130/2010.

Figura 3.12 : Equipamentos de ensaio de recuperação elástica.



### 3.3.6 Viscosidade Rotacional

O ensaio de viscosidade rotacional foi realizado no equipamento viscosímetro Brookfield Modelo DV-III ULTRA (Figura 3.13) acoplado a um controlador de temperatura Thermosel. O ensaio de viscosidade rotacional foi monitorado nas temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C. Foram utilizados “Spindle nº 21 de maior geometria para as amostras do CAP puro e nº 27 de menor geometria para as amostras do CAP modificado, de tal forma a respeitar a capacidade de operação do equipamento e manter os limites estabelecidos e a mesma taxa de cisalhamento aplicada para todos os ligantes.

Figura 3.13 : Equipamento de viscosidade rotacional (Brookfield), LEP/UAEC/UFCG.



Também foram realizados ensaios a diferentes faixas de temperatura para a determinação da curva de viscosidade x temperatura, a qual possibilitou obter as temperaturas de usinagem e compactação. A norma utilizada foi a NBR 15184/2004. De posse dos resultados obtidos no ensaio de viscosidade rotacional foi avaliado o grau de modificação – GM a partir da Equação 3.5 que relaciona a viscosidade do ligante modificado ( $V_{mod}$ ), ou seja, com adições de OM e OL com a viscosidade do ligante puro ( $V_{puro}$ ).

$$GM = \frac{V_{mod}}{V_{puro}} \quad (3.5)$$

Também foi determinado o índice de envelhecimento – IE obtido pela razão entre a viscosidade na condição envelhecida a curto prazo ( $V_{RTFO}$ ) e o valor da viscosidade na condição sem envelhecimento ( $V_{puro}$ ), conforme a Equação 3.6. Neste caso, cabe destacar que, a razão é obtida pelo mesmo ligante, isto é, na condição envelhecida após o RTFO com a condição antes do envelhecimento. Os maiores valores de IE indicam maior sensibilidade ao envelhecimento.

$$IE = \frac{V_{RTFO}}{V_{puro}} \quad (3.6)$$

Adicionalmente foram verificados os acréscimos de viscosidade - AV e decréscimos de viscosidades - DV considerando o CAP 50/70 e o CAP 55/75 como referência, com o auxílio da razão entre os ligantes na condição envelhecida a curto prazo e a condição antes do envelhecimento. Neste caso, tendo como referência os ligantes retromencionados. Esses parâmetros foram obtidos conforme a Equação 3.7.

$$AV \text{ ou } DV = \frac{V_{RTFO}}{V_{referência}} \quad (3.7)$$

### 3.3.7 Cisalhamento Dinâmico - DSR

O ensaio realizado com o equipamento Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR – Dynamic Shear Rheometer mede o módulo de cisalhamento complexo,  $G^*$ , e o ângulo fase  $\delta$ . Os ensaios realizados no DSR consistem em submeter uma pequena quantidade de ligante (posicionado entre duas placas paralelas) à tensões de cisalhamento oscilatórias. O parâmetro  $G^* \text{ sen } \delta$  pode ser relacionado ao trincamento por fadiga e o  $G^* / \text{sen } \delta$  com deformações permanentes. Foram ensaiadas amostras antes e após o envelhecimento a curto prazo. Foram estabelecidos valores mínimos capazes de garantir adequada resistência ao acúmulo de deformações permanentes ( $G^* / \text{sen } \delta$  maiores que 1,0 kPa e 2,2 kPa para amostras puras e envelhecidas, respectivamente).

Os ensaios reológicos foram realizados com o Reômetro Modelo DHR-1, do Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG (Figura 3.14). O comportamento viscoelástico do CAP foi obtido por meio da aplicação de uma tensão de cisalhamento oscilatória com variação de frequência ou temperatura e determinados o Modulo Complexo  $G^*$ , o Modulo Elástico  $G'$ , Modulo Viscoso  $G''$ , o ângulo de fase “ $\delta$ ” e a viscosidade. Os ensaios no DHR-1 foram realizados conforme o preconizado na norma da ASTM D7175 – 08.

Figura 3.14 : Reômetro de cisalhamento dinâmico do LEP/UAEC/UFCG.



No mesmo equipamento foi realizado o ensaio de Fluência e Recuperação sob Tensão Múltipla (MSCR – Multiple Stress Creep and Recovery) que é resultado do aperfeiçoamento do ensaio de Fluência Repetida e Recuperação (RCRT – Repeated Creep and Recovery) desenvolvido pela Administração Rodoviária Federal dos Estados Unidos (FHWA – Federal Highway Administration) e tem por designio avaliar o percentual de recuperação, a compliância não-recuperável e a dependência dos ligantes, especialmente os modificados, quanto ao nível de tensões com especificações empregadas no procedimento da norma ASTM D7405.

### 3.3.8 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier - FTIR

A análise da composição química do CAP convencional e do CAP modificado com adições de OM e OL foi realizada por meio de espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier - FTIR (Fourier Transform Infrared). Neste estudo optou-se por utilizar apenas o percentual de 5% de OM e de OL adicionados ao CAP convencional e modificado. Os espectros das amostras de CAP convencional e CAP modificado com 5% óleo de Mamona e de Linhaça foram obtidos no espectrômetro da Nicolet, modelo iS10, na faixa de 500 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ , no módulo da refletância total atenuada (ATR - em inglês Attenuated Total Reflectance) realizados na UFS.

Para a avaliação do envelhecimento foram calculadas as áreas das principais bandas características do CAP a exemplo da Figura 3.15 (JIA et. al., 2013). Foram determinados os índices estruturais mais comumente utilizados para análise de ligantes asfálticos, são eles: índices de oxidação ( $I_{C=O}$ ), Aromáticos ( $I_{C-C}$ ), Alifáticos ( $I_{AF}$ ) e Sulfóxido ( $I_{S=O}$ ). Os índices foram obtidos pela razão entre as áreas, conforme Equações de 3.8 a 3.11. As áreas foram calculadas com auxílio do programa Bentley PowerCivil for Country V8i (SELECTseires 2) - Version 08.11.07.428.

$$I_{C=O} = \frac{A(1700)}{\sum A} \quad (3.8)$$

$$I_{C-C} = \frac{A(1600)}{\sum A} \quad (3.9)$$

$$I_{AF} = \frac{A(1376 + 1470)}{\sum A} \quad (3.10)$$

$$I_{S=O} = \frac{A(1032)}{\sum A} \quad (3.11)$$

Sendo:

A (1700) – área correspondente a banda em torno de 1700 cm<sup>-1</sup>;

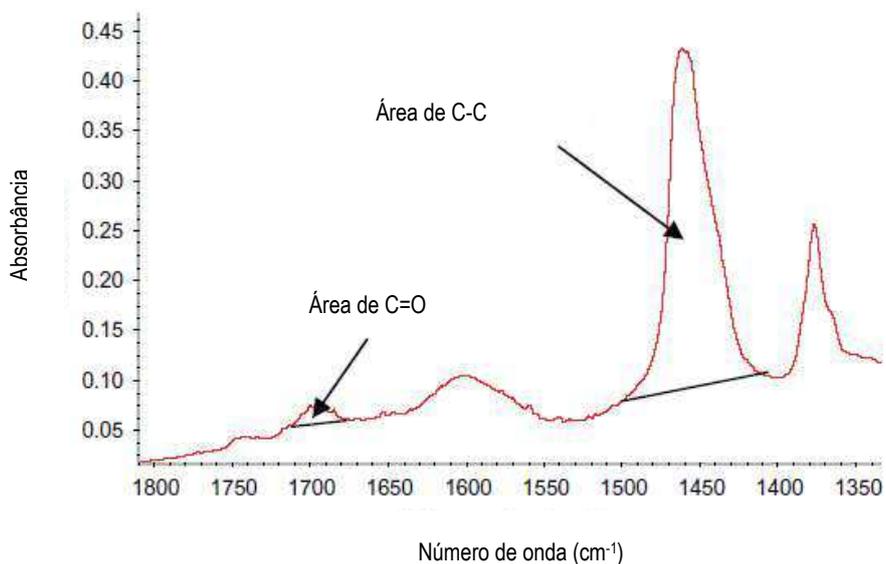
A (1600) – área correspondente a banda em torno de 1600 cm<sup>-1</sup>;

A (1376+1470) – soma das áreas correspondentes as banda em torno de 1376 e 1470 cm<sup>-1</sup>;

A (1032) – área correspondente a banda em torno de 1031 cm<sup>-1</sup>;

ΣA – Somatório das áreas de todas as bandas do espectro.

Figura 3.15 : Cálculo das áreas C=O e C-C (adaptado de JIA et. al., 2013).



### 3.4 Propriedades Físicas dos Materiais Granulares

Nesta etapa foram realizados os ensaios para a caracterização física e mecânica dos agregados utilizados na presente pesquisa, demonstrados por meio da Figura 3.16.

Figura 3.16 : Sequência de atividades para a caracterização dos agregados.



### 3.4.1 Granulometria

A granulometria consiste em determinar as dimensões das partículas do agregado e das suas respectivas percentagens de ocorrência, respeitando a norma DNIT ME 083/98. O ensaio consiste na separação após quarteamento da amostra a ser ensaiada e posterior peneiramento em conjunto de peneiras normatizadas. A partir destas foram estabelecidas as proporções dos agregados grãos e miúdos, de acordo com as especificações da Faixa granulométrica “B” preconizadas pelo DNIT, para a obtenção do teor ótimo de asfalto pelo procedimento Marshall e pelo método SUPERPAVE, obtidos pela utilização da curva Fuller.

O mesmo conjunto de peneiras foi utilizado tanto nas granulometrias dos agregados grãos como nas granulometrias dos agregados miúdos, devido à baixa presença de materiais pulverulentos ou argilo-minerais encontrados nos agregados miúdos.

### 3.4.2 Absorção

Absorção, por definição da norma é o aumento da massa de agregado, devido ao preenchimento por água de seus vazios permeáveis, expresso como porcentagem de sua massa seca. Embora não exista uma limitação dessa característica do agregado para o seu uso, um agregado poroso irá absorver ligante asfáltico e conseqüentemente consumir parte do ligante necessário para conferir coesão à mistura, essa característica é obtida pelo ensaio normatizado pela DNIT ME 081/98, para agregados grãos e DNIT ME 084/95, para agregados miúdos.

O ensaio de absorção para agregados grãos consistiu em:

- separação amostral - a amostra a ser ensaiada foi previamente quarteada e depois peneirada, sendo descartado o material passante na peneira de 4,8 mm. Destaca-se que massa a ser separada foi relacionada ao tamanho máximo nominal do agregado (prescrito em norma);
- a amostra foi lavada sobre a peneira 4,8 mm e seca em estufa até constante de massa, com posterior resfriamento da amostra a temperatura ambiente;

- seguiu a imersão da amostra em água a temperatura ambiente e agitação para evitar formação de bolhas. A amostra ficou imersa por um intervalo de  $24 \pm 4$  horas;
- removeu-se a amostra da imersão e espalhou-se sobre um pano com boa absorção. Os agregados foram secados até que as películas visíveis de água foram eliminadas, forçando nos agregados a condição de saturada superfície seca (Mh);
- a amostra foi secada novamente em estufa e o seu peso anotado (Ms).

A absorção (a) é obtida pela Equação 3.12:

$$a = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100 \quad (3.12)$$

Sendo:

a – absorção do agregado em porcentagem, %;

Ms = massa, ao ar, do agregado seco em estufa, em g;

Mh = massa, ao ar, do agregado na condição saturada superfície seca, em g;

O ensaio de absorção para agregados miúdos consistiu em:

- separação amostral - a amostra a ser ensaiada foi previamente quarteada e foi peneirada retirando impurezas visíveis e descartada. Essa amostra foi peneirada nas peneiras de aberturas de 4,8 mm e 0,075 mm, sendo separada uma porção representativa de aproximadamente 500 g;
- a amostra foi secada em estufa até constante de massa, com posterior resfriamento da amostra a temperatura ambiente;
- seguiu a imersão da amostra em água a temperatura ambiente e agitação para evitar formação de bolhas. A amostra ficou imersa por um intervalo de  $24 \pm 4$  horas;
- removeu-se a amostra da imersão e espalhou-se sobre uma bandeja metálica. A amostra foi secada por um secador em baixa ventilação e temperatura. A amostra atingiu a condição de saturada superfície seca. Verificada com o auxílio de um molde, onde a amostra deve ser colocada e suavemente compactada com 25 golpes e desmoldagem;
- a amostra foi secada novamente em estufa e seu peso anotado (Ms).

### 3.4.3 Densidade específica/massa específica

Densidade específica/massa específica é descrita em norma como sendo a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis. Essa característica não só importante para a determinação das propriedades físicas da mistura asfáltica, como também para a própria determinação da composição da mistura. Esse ensaio é normatizado pela norma DNIT ME 081/98 para agregados graúdos e pela norma DNIT ME 084/95 para agregados miúdos.

O ensaio de massa específica para agregados graúdos consistiu, resumidamente, em:

- separação amostral - a amostra a foi previamente quarteada e foi peneirada, sendo descartado o material passante na peneira de 4,8 mm. A massa a ser separada relacionada ao tamanho máximo nominal do agregado (prescrito em norma);
- a amostra foi lavada sobre a peneira 4,8 mm e secada em estufa até constante de massa, com posterior resfriamento da amostra a temperatura ambiente;
- seguiu a imersão da amostra em água a temperatura ambiente e agitação para evitar formação de bolhas. A amostra ficou imersa por um intervalo de  $24 \pm 4$  horas;
- removeu-se a amostra da imersão e espalhou-se sobre um pano com boa absorção. Os agregados ficaram secos até que as películas visíveis de água fossem eliminadas, forçando nos agregados a condição de saturada superfície seca (Mh);
- pesar a amostra imersa (L);
- a amostra foi secada novamente em estufa e seu peso anotado (Ms).

A Massa específica em condição seca ou massa específica aparente ( $D_{ap}$ ) é obtida pela Formula 3.13:

$$D_{ap} = \frac{M_s}{M_h - L} \quad (3.13)$$

sendo:

$D_{ap}$  = densidade aparente;

L = leitura na balança correspondente ao agregado submerso, em g.

A Massa específica em condição saturada seca ou massa específica real ( $D_r$ ) é obtida pela Equação 3.14:

$$D_r = \frac{M_h}{M_h - L} \quad (3.14)$$

O ensaio de massa específica para agregados miúdos consiste em:

- separação amostral - a amostra foi inicialmente quarteada e depois peneirada retirando impurezas visíveis e descartado. Essa amostra foi peneirada nas peneiras de aberturas de 4,8 mm e 0,075 mm, sendo separada uma porção representativa de aproximadamente 1000 g;
- a amostra foi seca em estufa até constante de massa, com posterior resfriamento da amostra a temperatura ambiente;
- seguiu a imersão da amostra em água a temperatura ambiente e agitação para evitar formação de bolhas. A amostra ficou imersa por um intervalo de  $24 \pm 4$  horas;
- removeu-se a amostra da imersão e espalhou-se sobre uma bandeja metálica. A amostra foi secada com auxílio de um secador e atingiu a condição de saturada superfície seca, a qual foi verificada com o auxílio de um molde, onde a amostra foi colocada e suavemente compactada com 25 golpes. A amostra foi colocada em um picnômetro (de volume conhecido de aproximadamente 500 ml ( $v$ ) e peso obtido previamente). Registrando a massa do conjunto ( $m_1$ );
- inseriu-se água ao frasco e o frasco é agitado para eliminar possíveis bolhas de ar;
- colocou-se o picnômetro em “banho maria” a temperatura constante de  $21 \pm 2$  °C por um intervalo de aproximadamente 1 horas;
- completou-se o picnômetro com água e determinou-se o seu peso ( $m_2$ );
- a amostra foi retida do picnômetro e seca novamente em estufa e seu peso anotado ( $m$ ).

A massa específica aparente do agregado ( $d_{ap}$ ) será obtida pela Formula 3.15:

$$d_{ap} = \frac{m}{\left( v - \left( \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \right) \right) - \left( \frac{mh - m_1}{\rho_a} \right)} \quad (3.15)$$

Com  $\rho_a$  sendo a massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico.

A massa específica real do agregado ( $d_r$ ) será obtida pela Formula 3.16:

$$d_r = \frac{Mh}{\left( v - \left( \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \right) \right)} \quad (3.16)$$

### 3.4.4 Abrasão Los Angeles

Desgaste Los Angeles descrito em norma é o desgaste submetido ao agregado, quando colocado na máquina “Los Angeles” (Figura 3.17) juntamente com uma carga abrasiva e submetida a um determinado número de revoluções dessa máquina à velocidade de 30 a 33 rpm. Após ensaiada a amostra é peneirada em peneiras de abertura de 1,7 mm e lavadas, sendo secas em estufa, pesadas após resfriamento e estabilização de temperatura. O desgaste é convencionalmente expresso em porcentagem de peso, relacionando o peso inicial inserido na máquina e o peso final da amostra após o ensaio.

Figura 3.17 : Máquina para o ensaio de Abrasão Los Angeles.



O ensaio de Abrasão é normatizado pela norma DNIT – ME 035/98. A normatização estabelece que para os serviços de pavimentação o valor da abrasão “Los Angeles” deve ser menor que 65%, portanto, o valor encontrado indica que o agregado pode ser utilizado em misturas asfálticas. Admitindo-se excepcionalmente agregados com valores maiores, no caso de terem apresentado comprovadamente desempenho satisfatório em utilização anterior.

### 3.4.5 Índice de forma

O ensaio de índice de forma é a média da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos do agregado, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica que o compõe. Sendo normatizado pela DNIT ME 086/94. Esse índice varia de 0,0 a 1,0 (ou de 0 a 100%), sendo o agregado considerado de ótima cubicidade quando  $f = 1,0$  e lamelar quando  $f = 0,0$ . Normalmente é adotado o limite mínimo de  $f = 0,5$  para aceitação de agregados quanto à forma.

O ensaio consiste no peneiramento de uma amostra em crivos redutores de abertura circular e retangular. Inicialmente avalia-se a distribuição granulométrica do agregado que será ensaiado e determina-se a

faixa de seleção do espaço amostral. A amostra passa por crivos redutores circulares, separando em frações passantes e retidas de acordo com a faixa escolhida. Separada em frações estabelecidas pela Norma DNIT ME 086/94, a amostra passa por peneiramento em crivos redutores retangulares, de acordo com a faixa escolhida. A partir dos pesos retidos nesses crivos é determinado o índice de forma do agregado analisado. Na Figura 3.18 constam os crivos redutores a serem utilizados nesse ensaio.

Figura 3.18 : Crivos redutores circulares e quadrados.



### 3.4.6 Equivalente areia

O ensaio de equivalente de areia é descrito na norma DNIT-ME 054/97. Definido como a relação volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível superior da areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de solo ou de agregado miúdo, numa proveta, em condições estabelecidas neste método. Este determina a proporção relativa de materiais do tipo argila ou pó em amostras de agregados miúdos. Para que um agregado possa ser utilizado em concreto asfáltico deve apresentar o equivalente de areia de pelo menos 55%.

Antes de realizar o ensaio foi preparada, de antemão, uma solução de cloreto de cálcio, glicerina e formaldeído. A amostra foi passada na peneira de abertura de 4,8 mm e colocada em um recipiente de medida padronizado, também encontrado no conjunto para realizar o ensaio. Com a amostra preparada, uma proveta de aproximadamente 40 cm foi preenchida até uma marca de aproximadamente 10 cm com a solução.

Inseriu-se a amostra com o auxílio de um funil e bateu-se levemente no fundo para evitar a formação de bolhas. Deixou-se em a proveta em repouso por 10 minutos. Após o descanso, a proveta foi tapada com uma rolha de borracha e agitada vigorosamente em movimentos horizontais e alternados, executando-se 90 ciclos em 30 segundos. Ao final da agitação retirou-se a rolha e a solução foi inserida com o auxílio de um tubo injetor. As paredes foram lavadas inserindo o tubo na amostra, a fim de levantar o material argiloso eventualmente existente na amostra. Preenchendo a proveta até uma altura aproximada de 38 cm e deixando em repouso por um intervalo de 20 minutos. Esse repouso necessita de cuidado para evitar perturbações e, assim, o descarte do ensaio, visto que pode interferir na velocidade de sedimentação da argila.

Ao fim do repouso determinou-se o nível superior de suspensão de argila com o auxílio de uma régua. Introduziu-se então o pistão cuidadosamente na proveta até assentar completamente na areia. Girou-se levemente, sem empurrá-lo para baixo, até que um dos parafusos se tornou visível. Determinou-se essa leitura como sendo a correspondente ao nível superior da areia. A Figura 3.19 mostra um exemplo de amostra sendo ensaiada.

Figura 3.19 : Ensaio de equivalente areia.



### 3.4.7 Adesividade

Adesividade do ligante asfáltico consiste no efeito da água em separar ou descolar a película de ligante asfáltico da superfície do agregado e pode torná-lo inaceitável para uso em misturas asfálticas. O ensaio que avalia a adesividade ao ligante asfáltico é o presente na Norma DNIT ME 078/94. Esse ensaio consistiu, basicamente, em envolver o agregado com uma quantidade de 17,5 gramas do ligante a ser utilizado. Após a cura dessa mistura ela foi levada a estufa em “banho maria” a 40°C por um período de 72 horas. Se após o término desse “banho maria” houver desprendimento do ligante ao agregado, o mesmo é considerado não satisfatório.

### 3.4.8 Durabilidade

A avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou sulfato de magnésio é normatizada pela DNIT – ME 089/94. Esse método fixa o modo como se determina a resistência à desintegração dos agregados sujeitos à ação do tempo, pelo ataque de soluções saturadas de sulfeto de sódio ou de magnésio. O agregado deve ter uma perda inferior a 12%.

A norma descreve a composição das soluções a serem utilizadas nesse ensaio, bem como as frações a serem utilizadas do agregado. Esse sendo separado de acordo com a granulometria, em quantidades e peneiras específicas para cada tamanho máximo nominal do agregado a ser analisado. Essa frações separadas são imersas em solução de sulfeto de sódio ou magnésio por um período de 16 a 18 horas. Após o período de imersão a amostra foi retida, drenada durante  $15 \pm 5$  minutos e colocada na estufa até

constância de peso (aproximadamente 2 horas). A amostra foi resfriada até temperatura ambiente e só depois de resfriada colocada novamente em imersão. O processo de imersão e secagem constitui um ciclo, que foi repetido 6 vezes. Ao final foi possível fazer uma avaliação qualitativa do desgaste sofrido pela amostra e uma avaliação quantitativa. Para a avaliação quantitativa, ao final do último ciclo a amostra deve ser lavada em solução de cloreto de bário a 10%, para que fique livre do excesso de sulfeto de sódio ou magnésio. Lavou-se posteriormente em água corrente e foi secada em estufa até o peso constante. Após resfriamento a amostra foi peneirada em peneiras conforme a abertura descrita na norma, em função da dimensão da partícula.

### **3.5 Dosagem das Misturas Asfálticas**

#### **3.5.1 Considerações Iniciais**

As misturas asfálticas foram produzidas de acordo com um projeto de mistura elaborado, determinando-se o teor ótimo de ligante para a faixa granulométrica estabelecida e utilizando-se os métodos de dosagem Marshall e Superpave. O percentual de óleo de Mamona e de Linhaça utilizados nas dosagens Marshall e Superpave foi de 5%, em função dos bons resultados obtidos por SOUZA (2012) para o caso do óleo de Mamona. Para o óleo de linhaça a sua definição foi escolhida em função dos ensaios reológicos realizados que também apontaram 5% como melhor percentual. A seguir algumas considerações sobre as dosagens Marshall e Superpave.

O procedimento de dosagem Marshall é o único normatizado no Brasil sendo derivado das recomendações e alterações propostas pelo Waterways Experiment Station (WES) de 1948. Trata-se de um procedimento empírico baseado em parâmetros que melhor se relacionavam com o desempenho em campo quanto ao afundamento em trilha de roda e ao trincamento de revestimentos asfálticos submetidos às solicitações de aeronaves daquela época. Devido ao fato de necessitar de equipamentos simples, de baixo custo e demandar relativamente menor tempo que outros métodos, o procedimento Marshall se difundiu rapidamente para a maioria dos Estados Americanos e para outros países (ROBERTS et. al. 2002 ; CHAVES et. al. 2014).

O método foi utilizado com sucesso por muitos anos. Entretanto, a partir da década de 80 muitas rodovias Americanas de tráfego pesado começaram a relatar problemas prematuros com afundamentos em trilha de roda. Na maioria dos casos o excesso de ligante nas misturas foi admitido como responsável pelas ocorrências. Tal situação foi atribuída à compactação por impacto não produzir satisfatoriamente amostras com densidades similares as da pista (ROBERTS et. al. 2002 ; CHAVES et. al. 2014).

Segundo Chaves et. al. (2014) essa questão foi abordada no SHRP e tinha como objetivo identificar e definir as propriedades dos ligantes, dos agregados e das misturas que influenciassem o desempenho do pavimento e desenvolver métodos de ensaio para especificações baseadas em

desempenho. O resultado direto do programa SHRP foi o procedimento de dosagem Superpave que se caracteriza pela abordagem de aspectos relativos aos efeitos do clima e à preocupação com os principais fenômenos deflagradores dos defeitos em pavimentos asfálticos. Outro ponto positivo do Superpave foi a busca por um método de compactação de laboratório que reproduzisse mais fielmente a compactação de campo e, ao mesmo tempo, fornecesse um indicativo da habilidade de densificação das misturas. A consideração desses fatores representa um avanço tecnológico importante para o projeto de misturas asfálticas. Contudo, a análise quanto à previsão do desempenho da mistura permanece ainda não consolidada.

### 3.5.2 Dosagem Marshall

O objetivo do método é a obtenção do teor ótimo de ligante asfáltico a ser incorporado na mistura, de modo a satisfazer parâmetros volumétricos e mecânicos. Os principais parâmetros volumétricos determinados são: o volume de vazios de ar ( $V_v$ ), o volume de vazios no agregado mineral (VAM), o volume de vazios preenchidos com ligante (VCB) e a relação betume vazios (RBV). Esses parâmetros foram determinados mediante aplicação das Equações 3.16 a 3.19.

- volume de vazios –  $V_v$

$$V_v = \frac{DMT - G_{mb}}{DMT} \times 100 \quad (3.16)$$

- vazios com betume – VCB

$$VCB = \frac{G_{mb} \times \%a}{G_a} \times 100 \quad (3.17)$$

- vazios do agregado mineral – VAM

$$VAM = V_v + VCB \quad (3.18)$$

- relação betume/vazios - RBV

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \quad (3.19)$$

Sendo:

DMT – densidade máxima teórica;

$G_{mb}$  – densidade aparente;

$G_a$  – massa específica real do asfalto;

a% - porcentagem de asfalto.

A seguir é descrito, de forma sucinta, a dosagem Marshall realizado com base nas normas DNIT ME-043/95 e ABNT/NBR 12891 (1993).

1ª Etapa – Determinação das massas específicas reais dos materiais que irão compor a mistura (agregados, fíler e ligantes asfálticos);

2ª Etapa – Seleção da faixa granulométrica a ser utilizada de acordo com a mistura asfáltica, baseada em instruções técnicas e normativas de entidades competentes (DNIT, órgãos estaduais, entre outros. Foi escolhida a faixa B do DNIT;

3ª Etapa – Escolha da composição dos agregados, de forma a enquadrar a sua mistura nos limites da faixa B do DNIT;

4ª Etapa – Escolha das temperaturas de mistura e de compactação, obtidas a partir da curva viscosidade versus temperatura do ligante escolhido;

5ª Etapa – Adoção de teores de asfalto para os diferentes grupos de CPs a serem moldados. Cada grupo teve no mínimo 3 CPs. Para a granulometria selecionada foi adotado, inicialmente, o teor de 4,5% para o primeiro grupo de CPs. Os outros grupos tiveram teores de asfalto acima (T+0,5% e T+1,0%) e abaixo (T-0,5% e T-1,0%);

6ª Etapa – Após moldagem, resfriamento e desmoldagem dos CPs, foram obtidas as dimensões dos mesmos (diâmetro e altura). Determinou-se para cada CP suas massas secas e submersas em água;

7ª Etapa – A partir do teor de asfalto do grupo de CPs em questão, ajusta-se o percentual em massa de cada agregado;

8ª Etapa – Com base na porcentagem em massa de cada agregado, no teor de asfalto e nas massas específicas reais dos constituintes, calculou-se a densidade máxima teórica (DMT) correspondente ao teor de asfalto considerado utilizando o método Rice Test seguindo os procedimentos da norma ASTM D 2041/00;

9ª Etapa – Foram calculados os parâmetros volumétricos (volumes de vazios (Vv), vazio do agregado mineral (VAM) e relação betume/vazios (RBV));

10ª Etapa – Realizou-se o ensaio de estabilidade Marshall nos CPs.

Os requisitos exigidos para as misturas asfálticas preconizados pelas normas do DNIT de concreto asfáltico convencional e modificado por polímero são mostrados na Tabela 3.5 e na Tabela 3.6, respectivamente.

Tabela 3.5 : Requisitos de dosagem de concreto asfáltico – DNIT 031/2006-ES (DNIT, 2006).

Características	Metodo de ensaio	Camada de Rolamento	Camada de Ligação (Binder)
Porcentagem de volume de vazios, %	DNER – ME 043	3 – 5	4 – 6
Relação betume/vazios	DNER – ME 043	75 – 82	65 – 72
Estabilidade mínima, (Kgf), 75 golpes.	DNER – ME 043	500	500
Resistencia a Tração por Compressão Diametral Estática a 25 °C, mínima, MPa	DNER – ME 138	0,65	0,65

Tabela 3.6 : Requisitos de dosagem de concreto asfáltico modificado por polímero – DNIT ES 385/99 (DNIT, 1999).

Características	Camada de Rolamento	Camada de Ligação (Binder)
Porcentagem de volume de vazios, %	3 – 5	4 – 6
Relação betume/vazios	75 – 82	65 – 72
Estabilidade mínima, (Kgf), 75 golpes.	500	500
Fluência, mm	2,0 – 4,5	2,0 – 4,5
Resistencia a Tração por Compressão Diametral Estática a 25 °C, mínima, MPa	7,0 – 12,0	7,0 – 12,0

As propriedades mecânicas das misturas asfálticas foram avaliadas em corpos de prova moldados no teor ótimo obtido na dosagem Marshall. Foram utilizados 75 golpes por face para a compactação dos corpos de prova. Os materiais após a mistura foram submetidos ao envelhecimento, o qual consistiu em aplicar a temperatura de compactação – TC durante 2 horas com intuito de simular o efeito do envelhecimento que ocorre com a mistura no campo. Em seguida, foram moldados corpos de prova na temperatura de usinagem obtida com auxílio da curva de viscosidade versus temperatura referente à cada um dos ligantes ensaiados. Foram utilizados 75 golpes por face para a compactação dos corpos de prova com 100 mm de diâmetro e 65 mm de altura.

### 3.5.3 Dosagem Superpave

Na presente pesquisa foram seguidos os procedimentos emanados pela metodologia Superpave, utilizando o compactador giratório Servopac do LEP/UAEC/UFCG, apresentado na Figura 3.20, para a

compactação dos corpos de prova (CPs) com 100 mm de diâmetro e 65 mm de altura. Basicamente, a metodologia de dosagem Superpave, consiste em definir três curvas granulométricas compostas pela granulometria de cada um dos agregados constituintes da mistura. A faixa granulométrica de referência será a faixa B do DNIT 031/2006 – ES uma vez que é a mais utilizada no meio rodoviário nacional.

Figura 3.20 : Compactador giratório do LEP/UAEC/UFCG.



A dosagem Superpave consistiu, resumidamente, nos passos seguintes:

- escolha de três composições granulométricas atendendo a faixa B do DNIT, sendo denominadas: inferior, intermediária e superior. A inferior passa abaixo da zona de restrição. A intermediária é a combinação dos agregados que não fique próximo dos pontos de controle e nem da zona de restrição. A superior, por sua vez, é a que passa superior a zona de restrição;
- determinação do valor teórico de ligante inicial, de modo à mistura atinja 4% de vazios;
- determinação do teor ótimo de asfalto baseado em parâmetros volumétricos e, por fim;
- o estudo das propriedades mecânicas da mistura asfáltica confeccionado com o teor ótimo.

Para a compactação dos CPs foram utilizados três esforços de compactação (número de giros): (i) N inicial, (ii) N projeto e (iii) N máximo. Para avaliar a compatibilidade da mistura foram utilizados os esforços de compactação N inicial e N máximo. O N projeto é utilizado para a seleção do teor de CAP de projeto. Estes valores são empregados em função do tráfego e variam de acordo com a norma de

dosagem Superpave. Nesta pesquisa, optou-se em considerar o tráfego como de médio a alto (vias principais e rodovias rurais), consistindo, portanto de: N inicial = 8 giros, N projeto = 100 giros e N máximo = 160 giros, conforme Tabela 3.7. A sequência apresentada na Figura 3.21 exemplifica os passos utilizados para a dosagem pelo Método Superpave.

Tabela 3.7 : Número de giros especificados na norma de dosagem Superpave (BERNUCCI, et. al., 2006).

Parâmetros de Compactação			Tráfego
N inicial	N projeto	N máximo	
	50	75	Muito leve (vias locais)
7	75	115	Médio (rodovias coletoras)
8	100	160	Médio a alto (vias principais, rodovias rurais)
9	125	205	Alto (interestaduais, muito pesado)

Figura 3.21 : Sequência da dosagem Superpave (BERNUCCI, et. al., 2006).



A escolha do teor ótimo de CAP foi obtida com os mesmos parâmetros descritos anteriormente no método Marshall, com exceção da estabilidade Marshall. Vale salientar que, no método de Dosagem Superpave, embora nenhum novo ensaio de agregados tenha sido desenvolvido, métodos atuais de seleção e especificação foram aperfeiçoados e incorporados ao método. Como exemplo, a utilização de pontos de controle, critérios de restrição de utilização de agregados, zona de restrição, entre outras.

Outra importante característica do método Superpave é a curva de densidade máxima. 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 não permitir a inserção de um filme resistente ao asfalto. Para especificação de granulometria de agregados foram adicionadas duas características extras ao gráfico:

- pontos de controle, que correspondem aos pontos mestres onde a curva granulométrica deve se inserir;
- zona de restrição que se localiza sobre a faixa inferior da curva de densidade máxima formando uma região em que a distribuição dos tamanhos dos agregados não deve tocar. As curvas que cruzam a zona de restrição apresentam comportamento frágil dificultando a compactação da mistura e tornando-a susceptível à deformação permanente durante a sua 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.

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. Outro importante requisito de mistura é a relação pó/asfalto, este é calculado como a razão entre a porcentagem em peso do filer 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.

Por fim, obtido o teor ótimo de ligante, foram moldados corpos de prova compactados por amassamento considerando 100 de giros que representa um tráfego equivalente a carga de eixo simples (ESAL) entre  $3.10^6$  e  $3.10^7$ , considerado em vias urbanas de tráfego médio a pesado para então serem realizados os ensaios mecânicos.

### 3.6 Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas

Com os teores ótimos obtidos pelos métodos Marshall e Superpave foi adicionado o percentual de 5% de óleo de Mamona e de Linhaça nos ligantes CAP 50/70 e CAP 55/75. Em seguida, foram moldados corpos de prova compactados pelo método Marshall e Superpave para a realização dos ensaios mecânicos. A Figura 3.22 demonstra o fluxograma dos ensaios mecânicos realizados nas misturas asfálticas.

Figura 3.22 : Sequência de atividades para determinação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas.



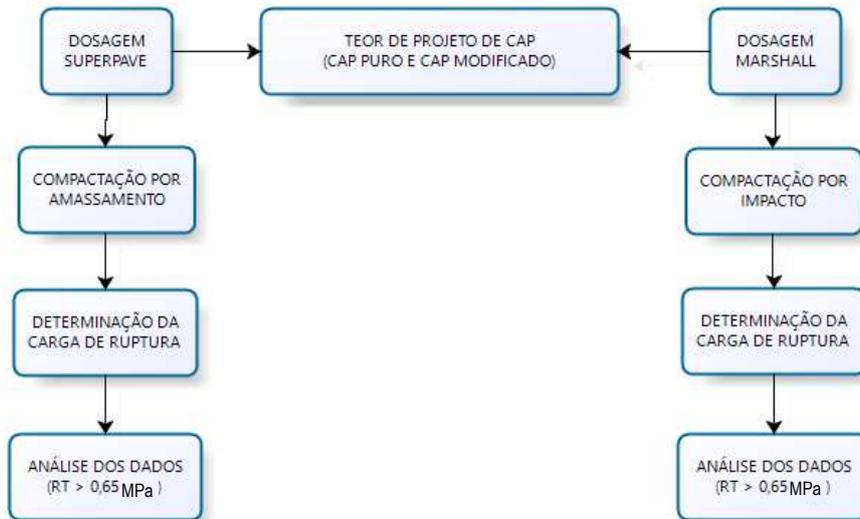
#### 3.6.1 Ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral - RT

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado conforme o preconizado na norma DNIT- ME 136/2010 do DNIT, que consiste no rompimento do corpo de prova à temperatura de 25°C. Os corpos de prova foram confeccionados no teor ótimo obtido nas dosagens Marshall e Superpave, este último respeitando a restrição imposta pelo método que é de 4% de volume de vazios. O equipamento utilizado está apresentado na Figura 3.23 e na Figura 3.24 a sequência do ensaio.

Figura 3.23 : Equipamento a ser utilizado para o ensaio de RT do LEP/UAEC/UFCG.



Figura 3.24 : Sequência do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.



### 3.6.2 Ensaio de Módulo de Resiliência

Segundo Motta (1991), para se efetuar a análise de deformabilidade da estrutura precisa-se conhecer as relações tensão-deformação ou os módulos de deformabilidade dos materiais que compõem as camadas. Um parâmetro considerado chave para o conhecimento do comportamento tensão-deformação de uma estrutura de pavimento é o módulo de resiliência (MR).

No Brasil os estudos com este tipo de ensaio começaram a ser desenvolvidos no final da década de 70, através do convênio firmado entre a COPPE (Coordenação de Pós Graduação e Pesquisa em Engenharia/Universidade Federal do Rio de Janeiro) e o IPR (Instituto de Pesquisas Rodoviárias), sob orientação do professor Jacques de Medina, o que possibilitou desenvolver um amplo programa de pesquisa, a partir do qual se acumulou uma gama de informações sobre as propriedades resilientes dos solos, das camadas asfálticas e cimentadas (CAVALCANTE, 2005).

O ensaio de módulo de resiliência – MR foi realizado conforme preconizado nas normas ASTM D4123-82 e DNIT ME 135/2010 na temperatura de referência 25°C. A tensão aplicada para a realização do ensaio foi correspondente a 10% da obtida nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral para cada uma das misturas. A aplicação do carregamento repetido foi no intervalo de 0,1 s e repouso de 0,9 s, no plano diametral vertical do 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 a tensão gerada (deslocamento horizontal). Esta frequência de aplicação de carga visa simular o efeito do tráfego de veículos. A sequência básica do ensaio está apresentada na Figura 3.25.

Figura 3.25 : Sequência do ensaio de módulo de resiliência.



Foram moldados dois 2 CPs para cada uma das metodologias utilizadas nesta pesquisa. A Figura 3.26 mostra o equipamento que foi utilizado para realizar o ensaio de MR.

Figura 3.26 : Equipamento para ensaio de Módulo de Resiliência do LEP/UAEC/UFCG.



Esse equipamento é do tipo prensa servo-hidráulica UTM-25 (Universal Testing Machine) da IPC Global. O equipamento é composto de um sistema pneumático de carregamento, uma câmara para controle de temperatura, um sistema de medição de deformação da amostra, um software para aquisição e análise de dados e uma estrutura de suporte e alinhamento do corpo de prova (SANTOS, 2012).

### 3.6.3 Ensaio de Lottman Modificado

O ensaio Lottman modificado é o teste para verificação da suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas mais utilizado no Brasil e de uso disseminado internacionalmente. Normatizado pela AASHTO T 283. O ensaio Lottman modificado é amplamente utilizado para avaliar o potencial de deslocamento da película de CAP de uma mistura asfáltica a quente e prever, considerando-se um prazo de quatro a doze anos, a suscetibilidade da mistura asfáltica ao dano por umidade (RIBEIRO, 2011).

Segundo Terrel e Al-Swailmi (1994) apud Tadeu Junior (2008) desde a década de 1930 numerosas metodologias de ensaio vêm sendo desenvolvidas na tentativa de identificar a suscetibilidade das misturas asfálticas ao dano por umidade. Estes procedimentos de ensaios vêm tentando simular a perda de resistência ou outros danos causados pela umidade no pavimento, avaliando e prevendo a resistência da combinação particular de asfalto, agregado e aditivos.

O procedimento original para determinação da resistência de misturas asfálticas ao dano por umidade foi desenvolvido por Lottman no final da década de 1970 (LOTTMAN, 1978). O condicionamento incluía a saturação em vácuo por 30 minutos seguido por um período de 30 minutos em pressão atmosférica.

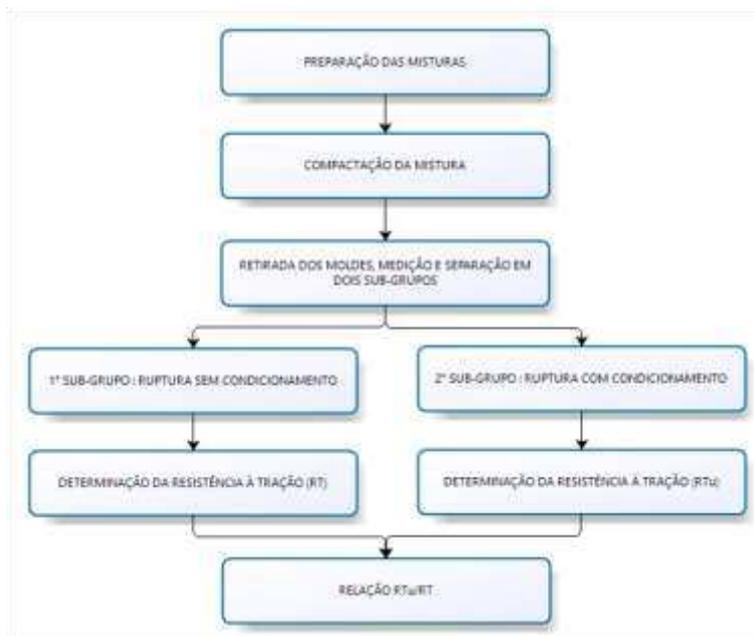
As amostras eram congeladas a uma temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$  por 15 horas seguidas por 24 horas em banho de água a  $60^{\circ}\text{C}$ . Alternativamente Lottman propôs outro tipo de condicionamento térmico, onde para cada ciclo, o corpo de prova era congelado por 4 horas e depois aquecido a  $60^{\circ}\text{C}$ . Desse modo um ciclo completo durava 8 horas e o condicionamento total incluía 18 ciclos. O ensaio AASHTO T 283 é uma modificação do ensaio Lottman original. Entre as modificações está a aplicação do vácuo até que se atinja 55% a 80% de saturação. Passou-se a utilizar para a determinação de RT a velocidade de 5cm/min e a temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  com a finalidade de que a prensa Marshall pudesse ser utilizada e para que fosse eliminada a refrigeração para a ruptura dos corpos de prova (ANITELLI, 2013).

O ensaio AASHTO T 283 tornou-se obrigatório nos procedimentos do método de dosagem Superpave®. Apesar de ter se baseado em observações de pavimentos em serviço, o principal problema do AASHTO T 283 é a sua reprodutibilidade e habilidade em prever a suscetibilidade a umidade com confiança razoável (SOLAIMANIAN e KENNEDY, 2000 apud ANITELLI, 2013).

A análise é feita pela relação entre as resistências à tração por compressão diametral de amostras previamente condicionadas e amostras sem condicionamento. Esta relação é dada pela relação (em percentagem) entre a  $RT_C$  das amostras condicionadas e a  $RT_{NC}$  das amostras não condicionadas, sendo denominada Resistência Retida à Tração (RRt). O critério de definição da suscetibilidade de uma mistura asfáltica preconizado pela AASHTO T283/89 é de  $RRt \geq 70\%$ ; na versão AASHTO T283/99 compatibilizada para o método Superpave o critério é de  $RRt \geq 80\%$ . O que se tem é uma razão, ou um “ponto de separação” que classifica misturas suscetíveis aos danos por umidade, ratificada pela

comparação com dados de pavimentos em serviço (FURLAN, 2006). Na Figura 3.27 consta a sequência do procedimento para a realização do ensaio.

Figura 3.27 : Sequência do ensaio de resistência a umidade induzida (Lottman modificado).



Para ambas as metodologias estudadas nesta pesquisa, Mashall e Superpave, foram moldados 3 CPs para cada mistura.

### 3.6.4 Ensaio de Desgaste Cântabro

Segundo Furlan (2006) o ensaio Cântabro, de origem espanhola, foi desenvolvido para medir o desgaste de misturas porosas pela perda de massa de um corpo-de-prova submetido à abrasão. O ensaio de desgaste Cântabro é normatizado pelo método de ensaio DNIT ME 383 (1999) permitindo avaliar, de maneira indireta, a resistência à desintegração de misturas asfálticas. Este ensaio utiliza o equipamento de abrasão Los Angeles (sem a utilização das esferas de aço) ao qual é submetido o CP compactado, à 300 revoluções a uma velocidade de 33 rpm e à temperatura de 25°C. Após as 300 revoluções, retira-se o CP e o material desprendido, determina-se o peso do CP ( $P'$ ) em relação ao peso original ( $P$ ) de modo a obter o desgaste da mistura asfáltica ( $A$ ), conforme a Equação 3.20 (RIBEIRO, 2011).

$$A = \frac{P - P'}{P} \times 100 \quad (3.20)$$

Sendo:

$A$  – desgaste da mistura asfáltica, com aproximação de 1%;

P – Peso do CP, antes do ensaio;

P' – Peso do CP, após o ensaio.

A norma DNIT ME 383 (1999) estabelece como limite de aceitação um valor inferior a 25% de desgaste para misturas asfálticas drenantes. Não há, portanto, limite de aceitação para misturas asfálticas densas (MOURA, 2001; MOIZINHO, 2007; BOCK, 2009; BUDNY, 2009; MOREIRA, 2009; GRANICH, 2010; FREITAS, 2010, RIBEIRO, 2011).

### 3.6.5 Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral

O principal mecanismo de ruptura de pavimentos flexíveis no Brasil é a fadiga do revestimento asfáltico sob a ação de cargas repetidas de tráfego, uma vez que o método utilizado para o dimensionamento de pavimentos novos. O método do DNIT, considera apenas o critério de ruptura por cisalhamento da camada de subleito.

A vida de fadiga das misturas a serem estudadas nesta pesquisa foi avaliada empregando ensaios de fadiga à tensão controlada de 30%, 35% e 40% da RT encontrada para cada mistura. Sendo ensaiada à 25°C e tendo como critério de ruptura o deslocamento de 4 mm conforme Santos (2005), que corresponde ao trincamento completo do material.

Para a determinação da vida de Fadiga das misturas asfálticas avaliadas neste estudo foi usado o ensaio de tração indireta por compressão diametral dinâmica. O equipamento utilizado é análogo ao equipamento do ensaio de módulo de resiliência, sendo a mesma frequência de carregamento, 1 Hz (0,1 s de carregamento e 0,9 s de descanso). O número de golpes necessário para que a amostra rompa diametralmente por fadiga foi registrado. Foram ensaiados 8 CPs a vários níveis de tensão (percentagem da resistência à tração por compressão diametral). As amostras, previamente condicionadas pelo período de três horas, foram ensaiadas quanto a resistência à fadiga na temperatura de 25°C.

Os resultados obtidos foram expressos em função da diferença de tensões e deformação resiliente específica, conforme modelos apresentados nas Equações 3.21 e 3.22. Na Figura 3.28 consta a sequência utilizada para a realização do ensaio.

$$N_f = k_1 \Delta \sigma^{-n_1} \quad (3.21)$$

Sendo:

Nf – número de solicitações para que ocorra a ruptura da amostra;

$\Delta\sigma$  – diferença algébrica entre as tensões verticais (de compressão) e horizontais (de tração) no centro da amostra;

$k_1$  e  $n_1$  – parâmetros de fadiga determinados em laboratório.

$$N_f = k_1 \varepsilon_i^{-n_1} \quad (3.22)$$

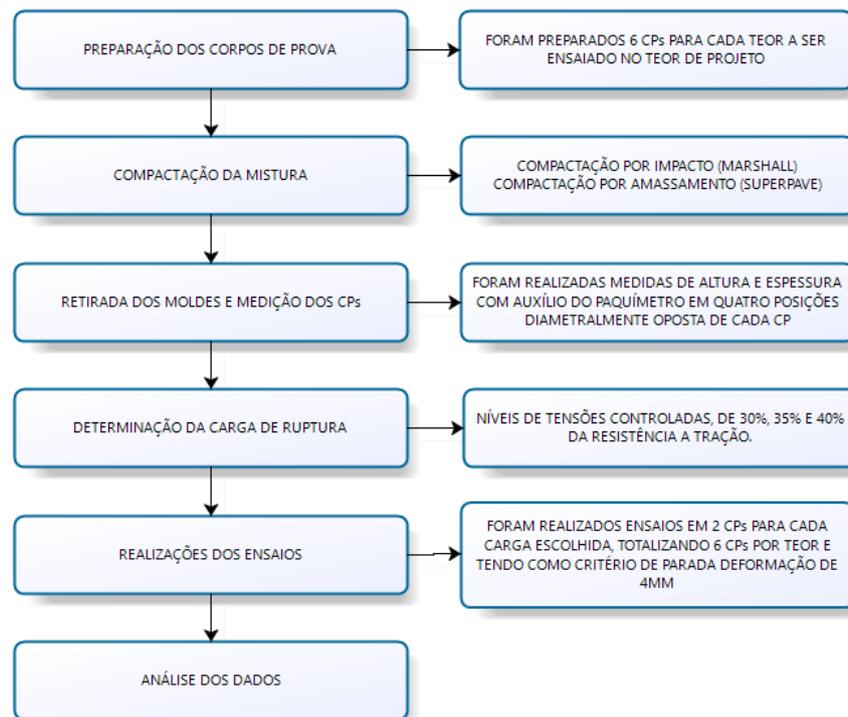
Sendo:

$N_f$  – número de solitações para que ocorra a ruptura da amostra;

$\varepsilon_i$  – diferença algébrica entre as tensões verticais (de compressão) e horizontais (de tração) no centro da amostra;

$k_2$  e  $n_2$  – parâmetros de fadiga determinados em laboratório.

Figura 3.28 : Sequência do ensaio de fadiga.



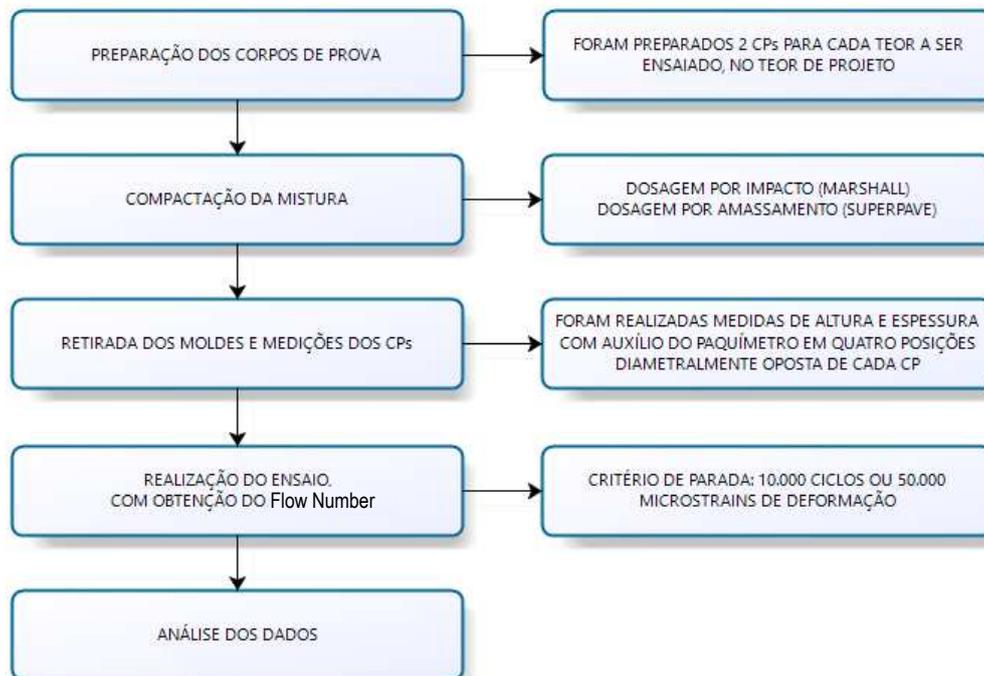
### 3.6.6 Ensaio de Deformação Permanente (Flow Number)

A avaliação da deformação permanente por compressão uniaxial com carregamento dinâmico (creep dinâmico) foi realizada em corpos de prova Marshall e Superpave utilizando o mesmo equipamento empregado na determinação do módulo de resiliência.

Os ensaios de Deformação (Flow Number), na presente pesquisa, foram realizados por meio do carregamento uniaxial de cargas repetidas a deformação controlada a partir de uma carga de compressão em amostras cilíndricas com 100 mm de diâmetro e 65 mm de altura.

No ensaio, a carga compressiva de 204 kPa foi aplicada com um tempo de carregamento de 0,1 segundos e com repouso de 0,9 segundos, até ser atingido um Máximo de 10.000 ciclos ou até uma deformação de 50.000 “microstrains” na temperatura de 60°C. Na Figura 3.29 consta a sequência do ensaio realizado.

Figura 3.29 : Sequência do ensaio de deformação permanente (Flow Number).



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo destina-se à apresentação dos resultados dos ensaios das propriedades reológicas e química dos ligantes puros e modificados antes e após o RTFO. Em seguida, são avaliadas as características físicas e mecânicas dos agregados e das misturas asfálticas elaboradas com auxílio das dosagens pelos métodos Marshall e Superpave.

### 4.1 Envelhecimento a Curto Prazo - RTFO

Neste item serão avaliados os resultados dos parâmetros de penetração, ponto de amolecimento, recuperação elástica e viscosidade rotacional nas condições antes do envelhecimento a curto prazo e após com auxílio do procedimento RTFO.

#### 4.1.1 Estabilidade à Estocagem

O ensaio de estabilidade à estocagem é realizado para analisar o risco de segregação do ligante asfáltico e do polímero durante o transporte e estocagem deste. Existem vários métodos de determinação da estabilidade a estocagem, porém todos se baseiam no mesmo princípio: estocagem a quente, sob temperatura controlada e comparação de uma ou mais propriedades do topo e fundo do corpo de prova.

Os resultados obtidos de estabilidade a estocagem indicaram que os ligantes apresentam adequada homogeneidade uma vez que a diferença entre os pontos de amolecimento foram muito pequenas conforme evidencia a Tabela 4.1. O percentual de 5% utilizado foi definido em função dos melhores resultados obtidos nas análises reológicas para ambas misturas de ligante asfáltico com os óleos de Mamona e de Linhaça.

Tabela 4.1: Resultados de estabilidade a estocagem.

Amostra	Ponto de Amolecimento (°C)		Diferença
	Topo	Base	
CAP 55/75	54,50	54,00	0,50
CAP 55/75 + 5 % de OM	50,00	49,80	0,20
CAP 55/75 + 5 % de OL	44,00	44,00	0,00

#### 4.1.2 Ensaio de Penetração

Na Tabela 4.2 constam os valores médios de penetração e penetração retida do CAP puro e modificado nas condições antes e após o envelhecido a curto prazo, bem como, os graus de modificação -  $G_M$ .

A adição dos óleos de Mamona e de Linhaça, em geral, promoveu aumento na penetração do CAP 50/70 o que indica uma menor rigidez do CAP modificado na temperatura de 25°C. Ainda, o aumento da penetração é verificada com a adição sucessiva dos óleos.

Os maiores acréscimos de penetração foram obtidos com o OL, apresentando valores, inclusive, superiores a faixa estabelecida na norma DNIT 095-2006-EM (50 a 70 a 25°C), igualmente, para o OM no tocante ao atendimento à faixa normativa.

O maior grau de modificação com a adição de Linhaça ( $G_M = 1,82$ ) foi para o CAP 50/70 + 6% de OL e no caso da adição de Mamona foi para o CAP 50/70+6% de OM com  $G_M = 1,37$ . Do mesmo modo, o CAP 55/75 (polímero SBS) apresentou a mesma tendência do CAP 50/70, neste caso, em termos de aumento da penetração com a adição dos óleos de Mamona e de Linhaça.

Com o envelhecimento a curto prazo com auxílio do RTFO, as penetrações do CAP 50/70 e do CAP 50/75, ambos com a adição dos óleos de Mamona e de Linhaça, em linhas gerais, apresentaram a mesma tendência de aumento de penetração com o acréscimo sucessivo dos óleos. No entanto, em face do envelhecimento, como é de se esperar, houve um enrijecimento dos ligantes após o RTFO resultando em menores valores de penetração. Os maiores graus de modificação após RTFO foram obtidos para os ligantes com OL ( $G_M = 1,24$ ,  $G_M = 1,26$  e  $G_M = 1,41$ ).

Com relação à penetração retida, nota-se que os maiores valores percentuais foram obtidos com adições do OM em ambos os CAPs 50/70 e 55/75. A maior penetração retida foi obtida com o CAP 55/75 + 6% de OM com 92,4%, seguida do CAP 55/75 + 4% de OM com 84,5%. Os percentuais preconizados em norma para a penetração retida são no mínimo 55% (DNIT 095/2006 – EM) e 60% (DNIT 129/2011-EM) para o CAP 50/70 e 55/57, respectivamente. Neste aspecto, não atenderam ao preconizado o CAP 50/70 com 5% e 6% de OL e o CAP 55/75 + 4% de OL.

Admitindo a penetração retida como um indicador da sensibilidade dos ligantes asfálticos ao envelhecimento a curto prazo, pode-se inferir que os ligantes com adição do OM são menos sensíveis ao envelhecimento por apresentarem maiores valores de penetração retida, o ligante já era bastante mole, conforme ilustrado na Figura 4.2.

Tabela 4.2: Resultados de Penetração e Penetração Retida.

AMOSTRA	Antes RTFO		Após RTFO		Penetração Retida (%)
	PEN (dmm)	G <sub>M</sub>	PEN (dmm)	G <sub>M</sub>	
CAP 50/70	69,2	1,00	44,8	1,00	DNIT 095/2006 – EM (55%)
CAP 50/70 + 4% de Óleo de Mamona	72,7	1,05	46,0	1,03	
CAP 50/70 + 5% de Óleo de Mamona	77,6	1,12	48,3	1,08	
CAP 50/70 + 6% de Óleo de Mamona	94,8	1,37	63,4	1,41	
CAP 50/70 + 4% de Óleo de Linhaça	99,0	1,43	55,4	1,24	
CAP 50/70 + 5% de Óleo de Linhaça	106,6	1,54	56,3	1,26	
CAP 50/70 + 6% de Óleo de Linhaça	125,8	1,82	63,1	1,41	
CAP 55/75	63,8	1,00	44,5	1,00	DNIT 129/2011-EM (60%)
CAP 55/75 + 4% de Óleo de Mamona	66,6	1,04	56,3	1,26	
CAP 55/75 + 5% de Óleo de Mamona	73,9	1,16	62,4	1,40	
CAP 55/75 + 6% de Óleo de Mamona	77,6	1,22	71,7	1,61	
CAP 55/75 + 4% de Óleo de Linhaça	93,6	1,47	53,6	1,20	
CAP 55/75 + 5% de Óleo de Linhaça	100,2	1,57	63,9	1,43	
CAP 55/75 + 6% de Óleo de Linhaça	116,4	1,82	77,4	1,74	

PEN = Penetração do ligante asfáltico

G<sub>M</sub> = Grau de modificação do ligante asfáltico

Em síntese, esses resultados apontam maior potencial do OL na modificação do CAP 50/70 e do CAP 55/75 refletida no aumento da penetração (ver Figura 4.1), diminuição do ponto de amolecimento e redução da viscosidade dos mesmos, esses dois últimos apresentado nos itens subsequentes. No entanto, o OL apresentou maior sensibilidade ao envelhecimento expressa em menores valores de penetração retida.

Figura 4.1: Resultados em gráfico de Penetração.

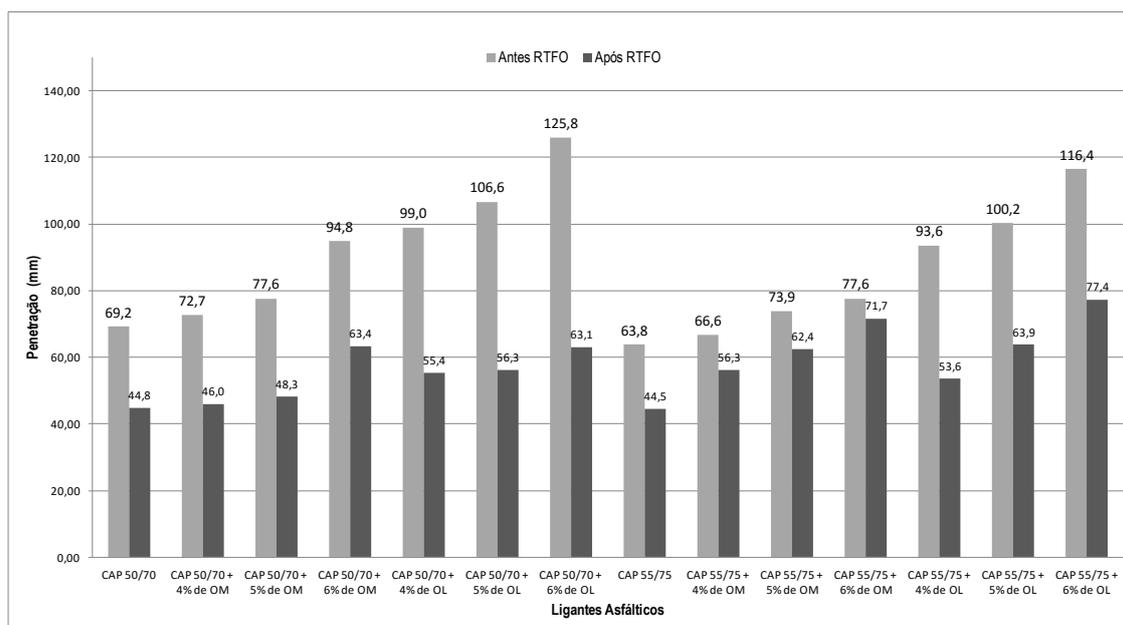
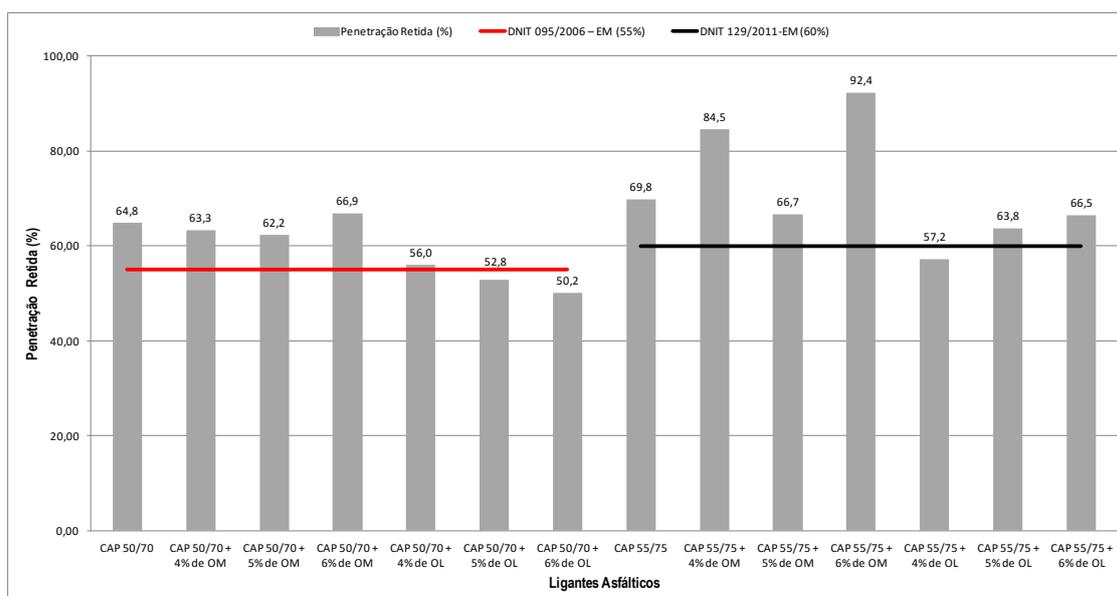


Figura 4.2: Resultados em gráfico de Penetração Retida.



#### 4.1.3 Ensaio de Ponto de Amolecimento

Na Tabela 4.3 e na Figura 4.3 constam os resultados médios de ponto de amolecimento para o CAP puro e modificado nas condições antes e após o envelhecimento a curto prazo, bem como, os graus de modificação -  $G_M$ . Os resultados indicaram, em geral, uma diminuição desse parâmetro para ambos os CAPs 50/70 e 55/75, promovidas pela adição sucessiva dos óleos para as condições antes e após o envelhecimento a curto prazo, indicando assim, uma menor rigidez dos ligantes. Sendo as adições de OL aquelas com maiores reduções (menores  $G_M$ ) variando de 34,10°C a 38,20°C para o CAP 50/70 antes do RTFO e 47,75°C a 49,25°C após o RTFO. Para o CAP 55/75 as adições do OL antes do RTFO reduziram também o ponto de amolecimento, mas já na condição de envelhecimento a curto prazo foram as adições do OM que obtiveram menores resultados variando de 50,8°C a 54,90°C. Adicionalmente, observa-se na Tabela 4.2 que os valores de  $G_M$  se mantiveram praticamente inalterados, para a maioria dos ligantes após o RTFO, apresentando pequenas variações, demonstrando assim pouca sensibilidade em relação aos acréscimos dos óleos de Mamona e de Linhaça.

Considerando o aumento do ponto de amolecimento, ou seja, o incremento em face do processo de envelhecimento após o RTFO, visualiza-se que as adições do OL foram as maiores variando de 11,05°C a 13,5°C para o CAP 50/70 e 13,05°C a 14,45°C para o CAP 55/75. Não atendendo assim, ao preconizado nas normas que estabelecem aumento máximo de 8°C (DNIT 095/2006 – EM) para o CAP 50/70 e o intervalo de -5°C a 7°C para o CAP 55/75 (DNIT 129/2011-EM). Em destaque, para os ligantes com adição de OM, o CAP 50/70 + 4% de OM (10,05°C) e o CAP 55/75 + 6% de OM (9,90°C) não atenderam ao máximo de 8°C e 7°C estabelecidos em normas, respectivamente.

Tabela 4.3: Resultados do Ponto de Amolecimento.

AMOSTRA	Antes RTFO		Após RTFO		Aumento do Ponto de Amolecimento (°C)	
	PA (°C)	G <sub>M</sub>	PA (°C)	G <sub>M</sub>		
CAP 50/70	47,75	1,00	52,50	1,00	4,75	DNIT 095/2006 - EM (8 °C)
CAP 50/70 + 4% de Óleo de Mamona	42,20	0,88	52,25	1,00	10,05	
CAP 50/70 + 5% de Óleo de Mamona	41,00	0,86	48,75	0,93	7,75	
CAP 50/70 + 6% de Óleo de Mamona	40,00	0,84	48,10	0,92	8,10	
CAP 50/70 + 4% de Óleo de Linhaça	38,20	0,80	49,25	0,94	11,05	
CAP 50/70 + 5% de Óleo de Linhaça	36,10	0,76	48,25	0,92	12,15	
CAP 50/70 + 6% de Óleo de Linhaça	34,10	0,71	47,75	0,91	13,65	
CAP 55/75	52,00	1,00	55,75	1,00	3,75	DNIT 129/2011-EM (Var. -5 a +7)
CAP 55/75 + 4% de Óleo de Mamona	47,00	0,90	51,70	0,93	4,70	
CAP 55/75 + 5% de Óleo de Mamona	46,10	0,89	50,80	0,91	4,70	
CAP 55/75 + 6% de Óleo de Mamona	45,00	0,87	54,90	0,98	9,90	
CAP 55/75 + 4% de Óleo de Linhaça	43,20	0,83	56,25	1,01	13,05	
CAP 55/75 + 5% de Óleo de Linhaça	41,15	0,79	54,75	0,98	13,60	
CAP 55/75 + 6% de Óleo de Linhaça	38,30	0,74	52,75	0,95	14,45	

PA = Ponto de amolecimento do ligante  
G<sub>M</sub> = Grau de modificação

Figura 4.3: Resultados em gráfico do Ponto de Amolecimento.

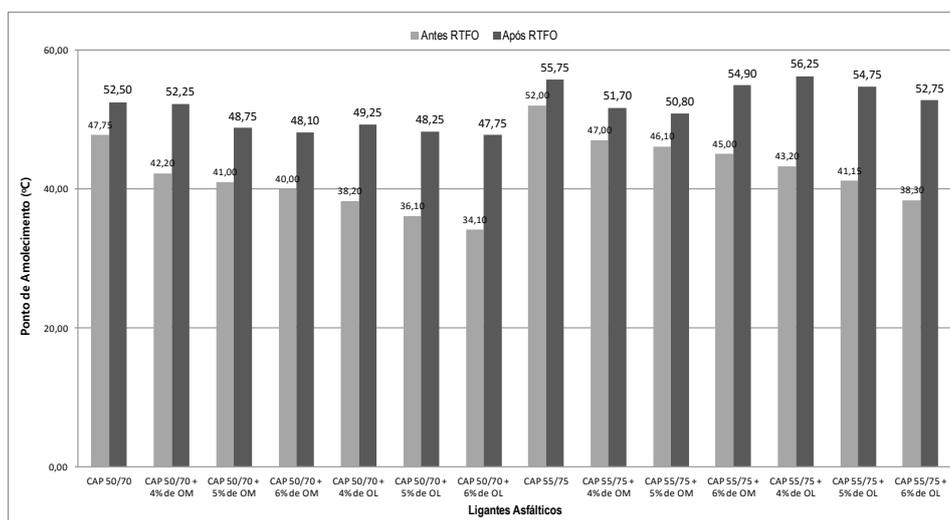
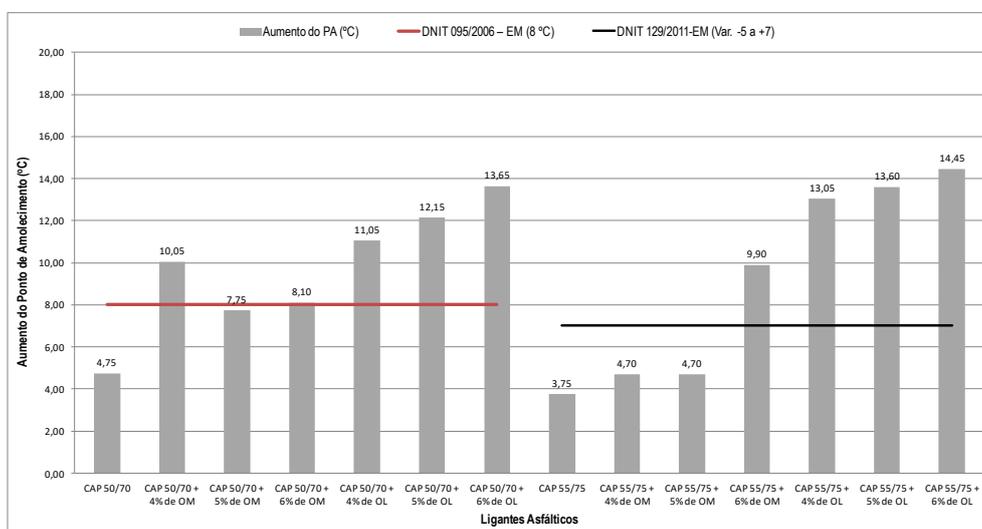


Figura 4.4: Resultados em gráfico do Aumento do Ponto de Amolecimento.



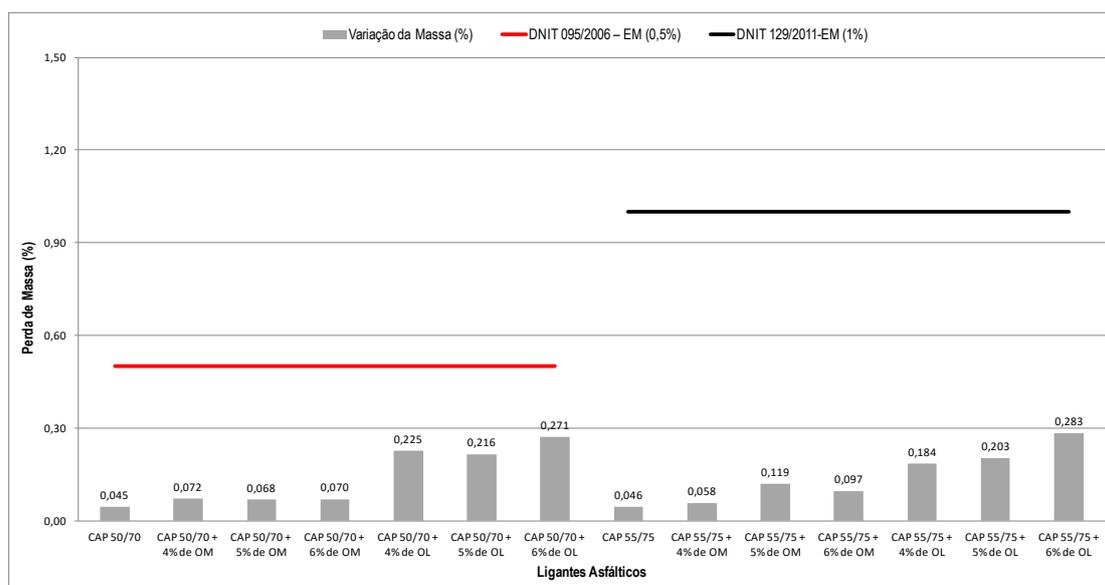
#### 4.1.4 Perda de Massa

Os resultados de perda de massa após o ensaio de RTFO estão apresentados na Tabela 4.4 e na Figura 4.5. Constata-se que todos os ligantes modificados apresentaram maiores perdas de massa em comparação ao CAP puro. Para as amostras modificadas observa-se maior perda de massa com o aumento dos teores dos óleos. As amostras com OL apresentaram maiores perdas de massa variando de 0,216 a 0,271 para o CAP 50/70 e 0,184 a 0,283 para o CAP 55/75. Para as amostras com adição de OM a perda de massa variou de 0,068 a 0,072 para o CAP 50/70 e 0,058 a 0,119 para o CAP 55/75. Não obstante, ambos os óleos atenderam ao estabelecido em norma conforme ilustrado na Figura 4.5.

Tabela 4.4: Resultados de perda de massa dos ligantes após o RTFO.

AMOSTRA	Envelhecimento a Curto Prazo - RTFO (Perda de Massa)			
	Antes	Após	Varição da Massa (%)	
CAP 50/70	217,44	217,34	0,045	Regulamento Técnico 03/2005 (0,5%)
CAP 50/70 + 4% de Óleo de Mamona	217,94	217,79	0,072	
CAP 50/70 + 5% de Óleo de Mamona	216,75	216,60	0,068	
CAP 50/70 + 6% de Óleo de Mamona	217,85	217,70	0,070	
CAP 50/70 + 4% de Óleo de Linhaça	221,65	221,16	0,225	
CAP 50/70 + 5% de Óleo de Linhaça	218,23	217,76	0,216	
CAP 50/70 + 6% de Óleo de Linhaça	216,96	216,37	0,271	
CAP 55/75	218,28	218,17	0,046	NORMA DNIT 129/2011 - EM (1%)
CAP 55/75 + 4% de Óleo de Mamona	215,72	215,60	0,058	
CAP 55/75 + 5% de Óleo de Mamona	216,61	216,36	0,119	
CAP 55/75 + 6% de Óleo de Mamona	218,03	217,82	0,097	
CAP 55/75 + 4% de Óleo de Linhaça	218,61	218,20	0,184	
CAP 55/75 + 5% de Óleo de Linhaça	217,33	216,89	0,203	
CAP 55/75 + 6% de Óleo de Linhaça	218,47	217,85	0,283	

Figura 4.5: Resultado em gráfico de perdas de massa.



#### 4.1.5 Recuperação Elástica

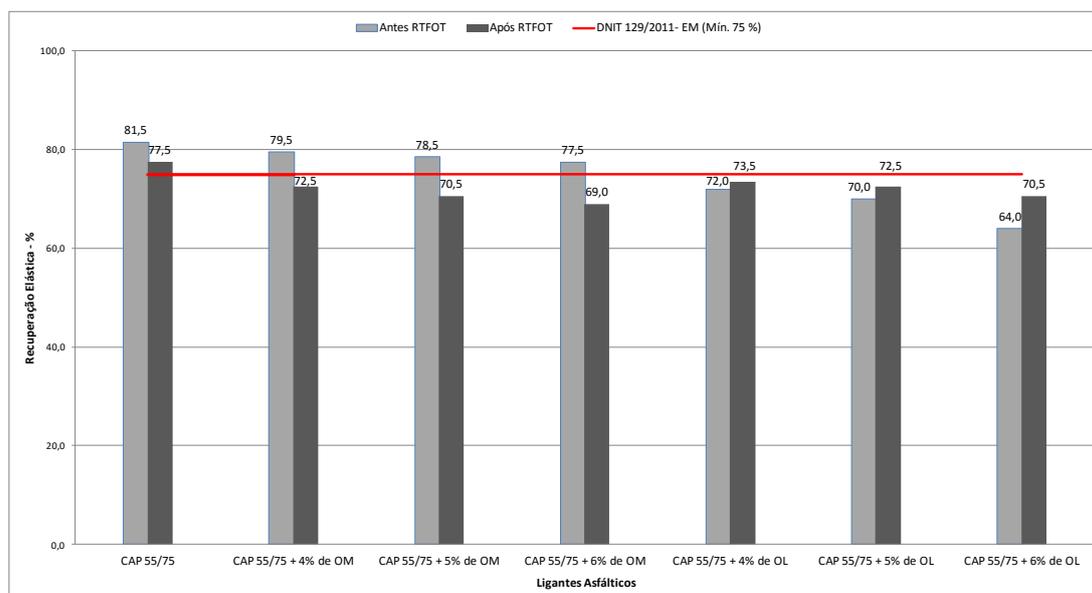
Na Tabela 4.5 e na Figura 4.6 constam os resultados do ensaio de recuperação elástica para ligante o modificado por polímero SBS (CAP 55/75). Os resultados indicaram uma diminuição desse parâmetro na medida em que são adicionados os percentuais de OM e OL em comparação com o CAP 55/75 puro. Entretanto, as misturas com OM atenderam ao preconizado na norma DNIT 129/2011-EM que é de no mínimo 75% para a recuperação elástica. Já as misturas com OL os resultados obtidos foram menores que o especificado na referida norma. Em princípio, a redução da recuperação elástica com a adição do OL pode ser atribuída ao efeito plastificante do mesmo. Este fato foi anteriormente observado nos resultados de penetração que tiveram significativa redução, uma vez que a adição do OM e OL plastificam, ou seja, amolecem a mistura reduzindo conseqüentemente a sua consistência. A maior recuperação elástica para amostras com OM foi obtida para o CAP 55/75 + 5% de OM (78,5%) antes do RTFO e para o OL foi de 73,5% após o RTFO e para o OL o maior valor foi para a CAP 55/75 + 4% de OL. Não obstante, um fato bastante peculiar foi o aumento da recuperação elástica das misturas com OL após o envelhecimento. Contrariando o comumente esperado que era a sua redução em face do envelhecimento a curto prazo. De todo modo, os ensaios foram realizados novamente e o efeito foi corroborado. Em princípio, atribui-se esse fenômeno ao fato da particularidade do OL em proteger o CAP do efeito do envelhecimento. Ainda, nota-se que, após o RTFO as recuperações elásticas obtidas com amostras com OL foram superiores àquelas com adição do OM. A norma DNIT 129/2011-EM estabelece, também, que a recuperação elástica após o RTFO corresponda a 80% da original. Neste aspecto, todas as amostras atenderam ao preceito da referida norma, conforme se evidencia na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Resultados em gráfico de recuperação elástica.

AMOSTRA	Recuperação Elástica (%) - RTFO					
	Antes RTFO		Após RTFO			
CAP 55/75-E	81,5	DNIT 129/2011-EM (mínimo de 75%)	77,5	Recuperação Elástica após o RTFO	65,2	DNIT 129/2011-EM (mínimo de 80% da Recup. Elást. Original)
CAP 55/75 + 4% de Óleo de Mamona	79,5		72,5		63,6	
CAP 55/75 + 5% de Óleo de Mamona	78,5		70,5		62,8	
CAP 55/75 + 6% de Óleo de Mamona	77,5		69,0		62,0	
CAP 55/75 + 4% de Óleo de Linhaça	72,0		73,5		57,6	
CAP 55/75 + 5% de Óleo de Linhaça	70,0		72,5		56,0	
CAP 55/75 + 6% de Óleo de Linhaça	64,0		70,5		51,2	

Observa-se na Tabela 4.5 que o óleo de linhaça pelas características físicas e moleculares promoveu ação plastificante (menor viscosidade) mais do que o óleo de mamona.

Figura 4.6: Resultados em gráfico de recuperação elástica.



#### 4.1.6 Resultado do Ensaio de Viscosidade Rotacional (Brookfield)

Os resultados obtidos de viscosidade rotacional estão sendo apresentados em centiPoise (cP), considerando a média obtidas a partir de três amostras para cada uma das temperaturas ensaiadas de 135°C, 150°C e 177°C. Uma análise dos valores alcançados e expostos na Tabelas 4.8 e na Tabela 4.9, bem como, nas de Figura 4.9 a 4.14 permitem afirmar que os Óleos de Mamona e de Linhaça possuem propriedades que possibilitam uma diminuição significativa na viscosidade do CAP puro e modificado, propiciando, por consequência, reduções nas temperaturas de usinagem e compactação – TUC,

possibilitando assim uma melhor trabalhabilidade da massa asfáltica durante a sua compactação. As reduções mais significativas de viscosidade foram às obtidas com a adição do óleo de Linhaça para ambos os CAPs 50/70 e 55/75. A seguir são apresentados os resultados obtidos de viscosidade nas condições antes e após o envelhecimento a curto prazo.

*Resultados dos ligantes asfálticos puros – Antes do RTFO*

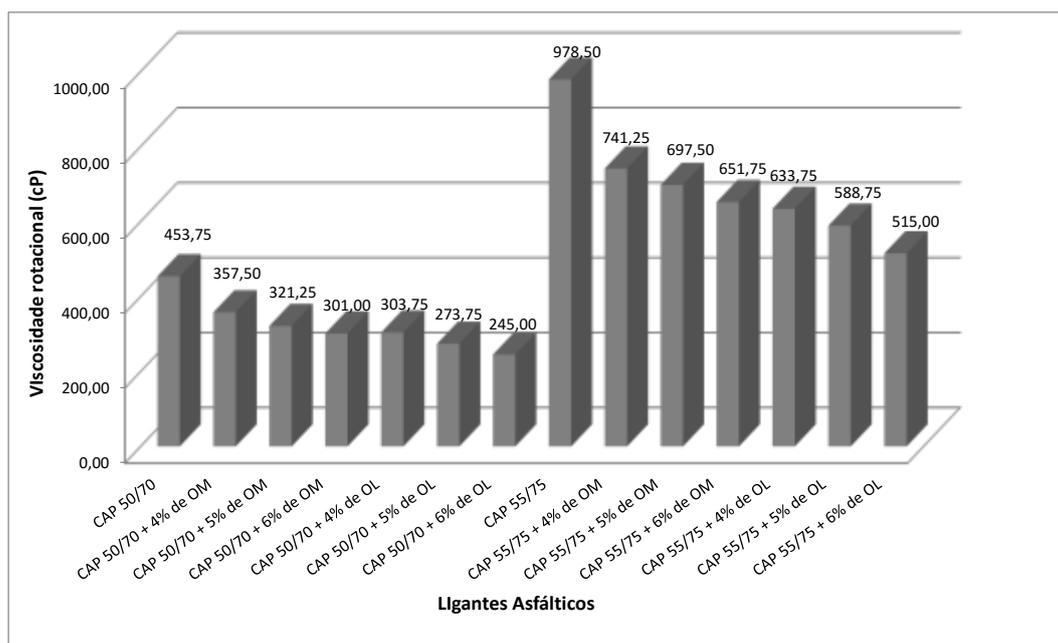
As viscosidades rotacionais obtidas para os ligantes asfálticos, na condição puro, resultaram em decréscimos substanciais, conforme consta na Tabela 4.6. As viscosidades diminuíram com o aumento dos percentuais de ambos os óleos. No caso do OM para amostras com o CAP 50/70, para a temperatura de 135°C, indicou  $G_M = 0,79$ , correspondendo a uma redução dessa propriedade de 21%, para adição de 4% e  $G_M = 0,66$ , neste caso, para adição de 6%, correspondendo a uma redução de 34%.

Tabela 4.6: Resultados de viscosidades rotacionais para os ligantes puros.

AMOSTRA	Viscosidade Rotacional (cP)					
	Temperatura (oC)					
	Antes RTFO					
	135	$G_M$	150	$G_M$	177	$G_M$
CAP 50/70	453,75	1,00	221,50	1,00	79,00	1,00
CAP 50/70 + 4% de Óleo de Mamona	357,50	0,79	182,00	0,82	68,50	0,87
CAP 50/70 + 5% de Óleo de Mamona	321,25	0,71	165,50	0,75	63,75	0,81
CAP 50/70 + 6% de Óleo de Mamona	301,00	0,66	155,50	0,70	60,25	0,76
CAP 50/70 + 4% de Óleo de Linhaça	303,75	0,67	158,00	0,71	60,75	0,77
CAP 50/70 + 5% de Óleo de Linhaça	273,75	0,60	141,50	0,64	55,25	0,70
CAP 50/70 + 6% de Óleo de Linhaça	245,00	0,54	130,00	0,59	51,50	0,65
CAP 55/75	978,50	1,00	464,00	1,00	159,50	1,00
CAP 55/75 + 4% de Óleo de Mamona	741,25	0,76	365,50	0,79	131,75	0,83
CAP 55/75 + 5% de Óleo de Mamona	697,50	0,71	323,00	0,70	119,25	0,75
CAP 55/75 + 6% de Óleo de Mamona	651,75	0,67	320,75	0,69	118,50	0,74
CAP 55/75 + 4% de Óleo de Linhaça	633,75	0,65	317,00	0,68	116,50	0,73
CAP 55/75 + 5% de Óleo de Linhaça	588,75	0,60	297,50	0,64	110,50	0,69
CAP 55/75 + 6% de Óleo de Linhaça	515,00	0,53	264,50	0,57	100,00	0,63

Por outro lado, o OL resultou em menores viscosidades ( $G_M$  menores) e, do mesmo modo, as reduções ocorrem em ordem crescente com os percentuais adicionados. Para o percentual de 4% de OL a redução foi de 33% ( $G_M=0,67$ ), seguida de 40% ( $G_M=0,60$ ) para adição de 5% e 46% ( $G_M=54$ ) para a adição de 6%. Com relação ao CAP 55/75 com polímero SBS, semelhantemente, os resultados seguiram a mesma tendência do CAP 50/70, todavia, as reduções foram menores visto que a viscosidade do CAP 55/75 é maior que a do CAP 50/70. Na Figura 4.7 constam os resultados de viscosidade em gráfico de barras sendo possível visualizar o decréscimo da viscosidade em função da adição dos óleos.

Figura 4.7: Resultados em gráfico de viscosidades rotacionais a 135°C para os ligantes puros.



Observa-se ainda na Figura 4.7 que apenas a viscosidade da amostra de CAP 50/70+6% de OL resultou inferior ao mínimo de 274 cP preconizado na norma DNIT 095/2006. Para o CAP 55/75 todas as amostras atenderam ao máximo de 3000 cP estabelecido na norma DNIT 129/2011-EM.

A Figura 4.8 apresenta as viscosidades rotacionais dos ligantes asfálticos na temperatura de 150°C. Assim como na temperatura de 135°C, as menores viscosidades foram obtidas com o OL, com  $G_M = 0,59$  (redução de 41%) para 6% de CAP 50/70 e  $G_M = 0,57$  (redução de 41%) para CAP 55/75 com 6%. Para o OM as menores reduções foram obtidas também com o percentual de 6%, resultando em uma diminuição de 30% ( $G_M = 70$ ) para o CAP 50/70 e praticamente a mesma para o CAP 55/75 ( $G_M = 0,69$ ) que corresponde a 29%. Todas as amostras com CAP 50/70 atenderam ao mínimo da norma DNIT 095/2006 que é 112 cP e máximo de 2000 cP para o CAP 55/75 segundo a norma DNIT 129/2011-EM.

A Figura 4.9 apresenta as viscosidades rotacionais dos ligantes asfálticos na temperatura de 177°C. Não diferentemente, a mesma tendência é observada na maior temperatura ensaiada, ou seja, menores viscosidades na medida em que se aumenta o percentual de OM e OL. Todavia, as amostras de CAP 50/70 com 5% e 6% não atenderam ao mínimo de 57 cP estabelecido pela norma DNIT 095/2006, porém, as demais amostras satisfizeram as normas supracitadas. Na Figura 4.10 visualizam-se, graficamente, as maiores diferenças entre as viscosidades para a temperatura mais baixa de 135°C e menores diferenças para a temperatura mais alta de 177°C.

Figura 4.8: Resultados em gráfico de viscosidades rotacionais a 150°C para os ligantes puros.

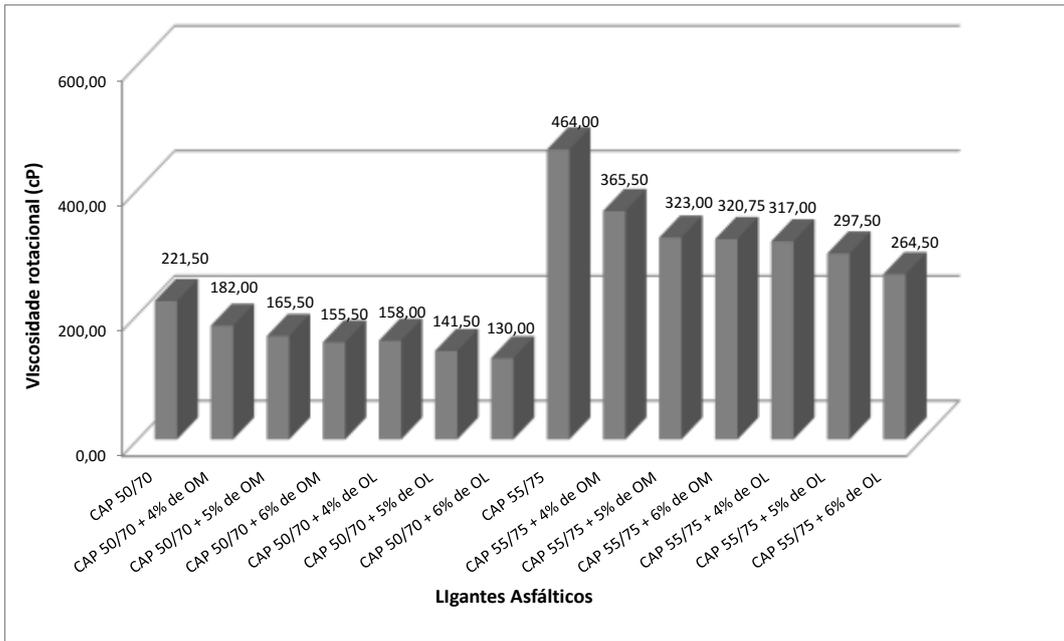


Figura 4.9: Resultados em gráfico de viscosidades rotacionais a 177°C para os ligantes puros.

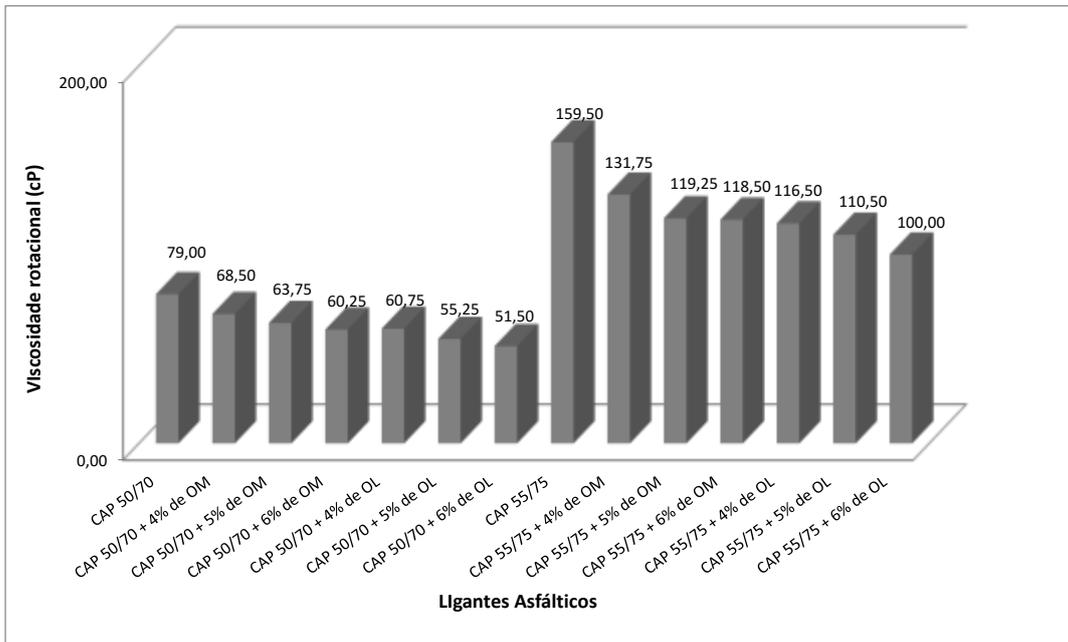
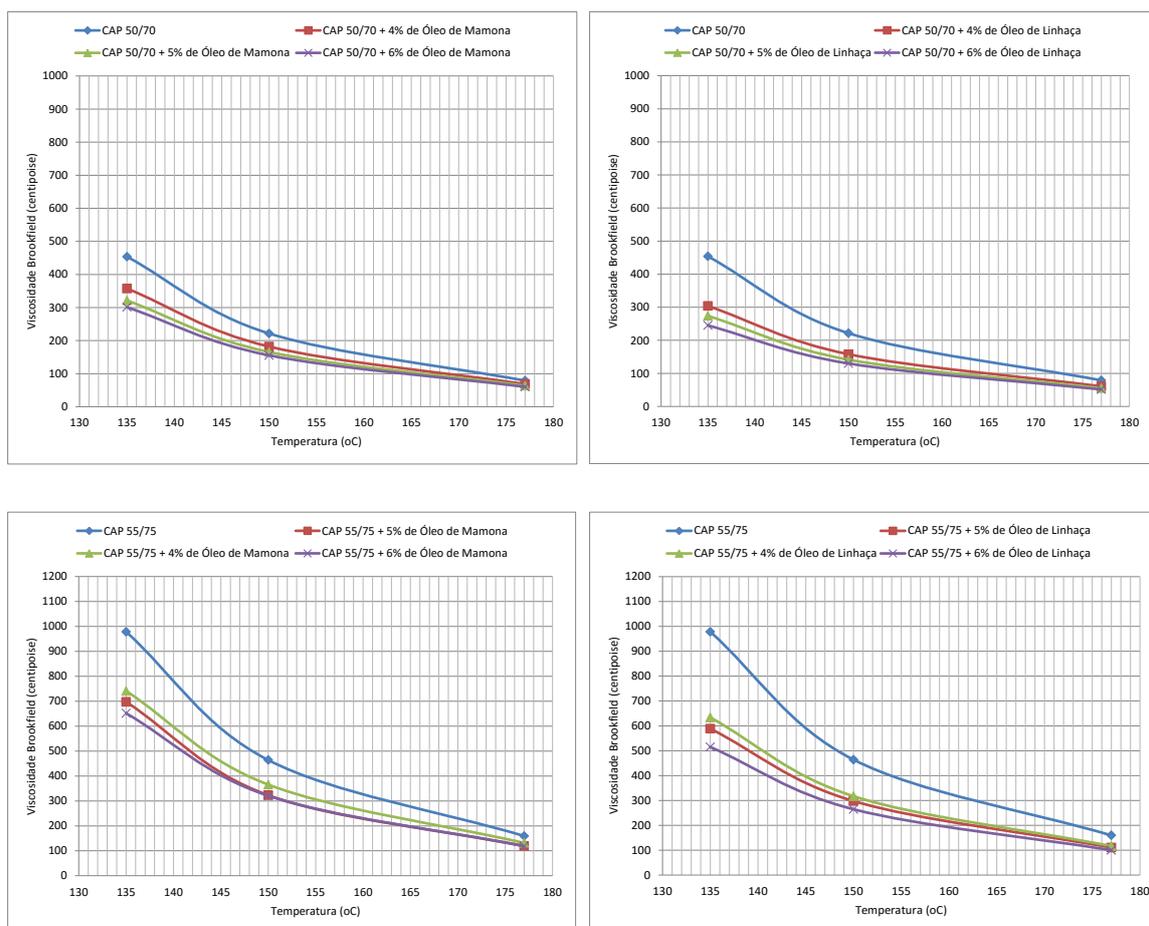


Figura 4.10: Resultados de viscosidades rotacionais nas diferentes temperaturas para ligantes puros.



#### Resultados dos ligantes asfálticos submetidos ao envelhecimento a curto prazo (RTFO)

Na Tabela 4.7 constam as viscosidades rotacionais dos ligantes asfálticos envelhecidos a curto prazo. As viscosidades, conforme anteriormente constatado, reduzem a partir do acréscimo do percentual de OM e de OL. Para a temperatura de 135°C a maior redução da viscosidade dos ligantes com adição do OM foi obtida com adição de 6% resultando em 34% ( $G_M = 0,66$ ). Para o CAP 55/75 a maior redução da viscosidade foi de 29% para o percentual de 6% de OM. Para o OL a maiores reduções de viscosidade foram obtidas com 5% para o CAP 50/70 que apresentou 31% ( $G_M = 0,69$ ) e 34% ( $G_M = 0,66$ ) para o percentual de 6%, neste caso, para o CAP 55/75. Nas Figuras 4.11, 4.12 e na 4.13 constam em gráfico as viscosidades para todos os ligantes nas temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C.

Tabela 4.7: Resultados de viscosidades rotacionais para os ligantes após o RTFO.

AMOSTRA	Viscosidade Brookfield (cP)					
	Temperatura (oC)					
	Após RTFO					
	135	G <sub>M</sub>	150	G <sub>M</sub>	177	G <sub>M</sub>
CAP 50/70	637,50	1,00	298,50	1,00	101,50	1,00
CAP 50/70 + 4% de Óleo de Mamona	518,75	0,81	251,00	0,84	87,75	0,86
CAP 50/70 + 5% de Óleo de Mamona	453,75	0,71	223,00	0,75	79,25	0,78
CAP 50/70 + 6% de Óleo de Mamona	418,75	0,66	211,00	0,71	77,25	0,76
CAP 50/70 + 4% de Óleo de Linhaça	465,00	0,73	229,00	0,77	81,00	0,80
CAP 50/70 + 5% de Óleo de Linhaça	442,50	0,69	219,00	0,73	78,75	0,78
CAP 50/70 + 6% de Óleo de Linhaça	475,00	0,75	232,50	0,78	83,25	0,82
CAP 55/75	1428,75	1,00	650,50	1,00	208,50	1,00
CAP 55/75 + 4% de Óleo de Mamona	1168,75	0,82	514,00	0,79	171,00	0,82
CAP 55/75 + 5% de Óleo de Mamona	1098,75	0,77	504,50	0,78	161,25	0,77
CAP 55/75 + 6% de Óleo de Mamona	1011,25	0,71	477,50	0,73	161,25	0,77
CAP 55/75 + 4% de Óleo de Linhaça	1120,00	0,78	522,50	0,80	173,25	0,83
CAP 55/75 + 5% de Óleo de Linhaça	1087,50	0,76	513,50	0,79	143,25	0,69
CAP 55/75 + 6% de Óleo de Linhaça	936,25	0,66	449,50	0,69	154,25	0,74

Na Figura 4.12 e na Figura 4.13 são apresentadas as viscosidades rotacionais dos ligantes asfálticos envelhecidos a curto prazo, considerando as temperaturas de 150°C e de 177°C, respectivamente. O mesmo comportamento para essas temperaturas é observado em termos de decréscimo das viscosidades com o acréscimo de OM e OL. Em destaque, os menores graus de modificação – G<sub>M</sub> foram obtidos com adição do óleo de Linhaça para ambos os CAPS 50/70 e 55/75. Além disso, o potencial dos óleos de Mamona e de Linhaça em propiciar a redução da viscosidade dos ligantes puro e modificado é característica fundamental, visto que as misturas asfálticas são produzidas em temperaturas relativamente elevadas podendo acarretar em oxidação excessiva do ligante.

Figura 4.11: Resultados em gráfico de viscosidades rotacionais a 135°C para os ligantes após RTFO.

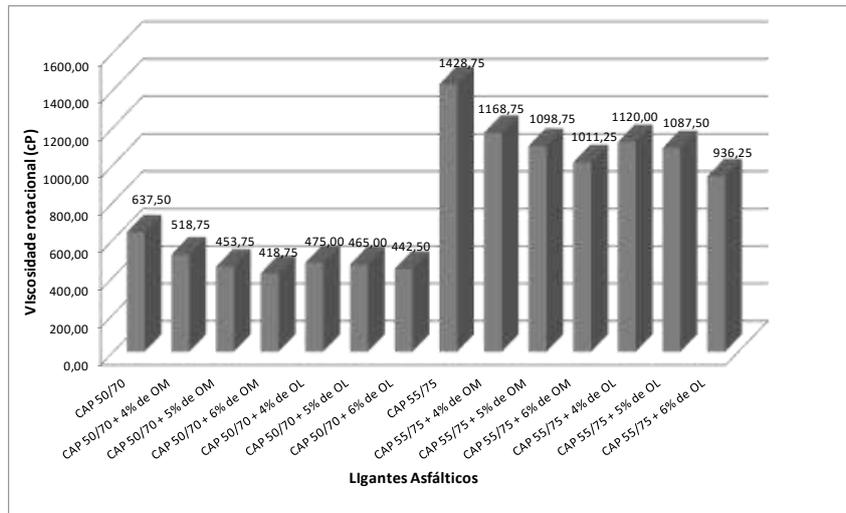


Figura 4.12: Resultados em gráfico de viscosidades rotacionais a 150°C para os ligantes após RTFO.

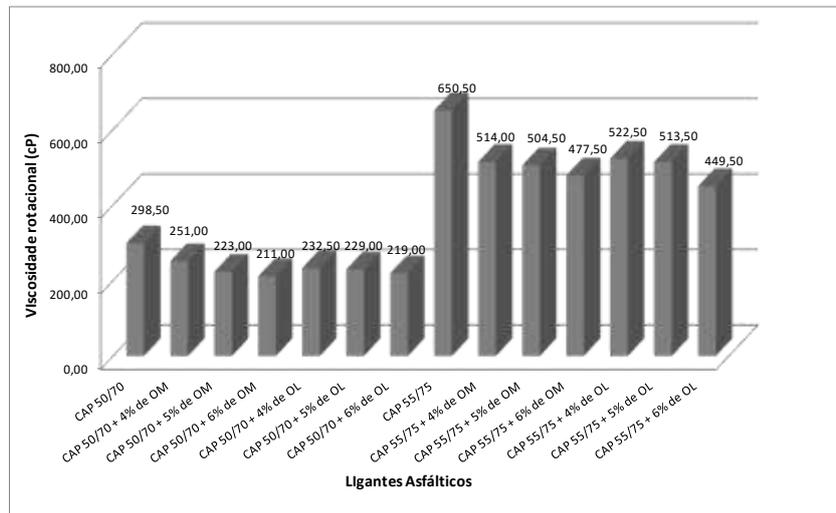
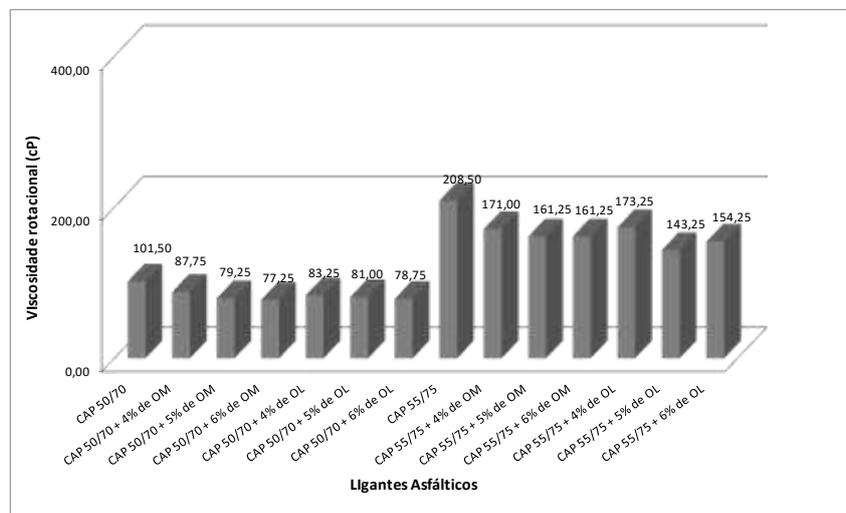
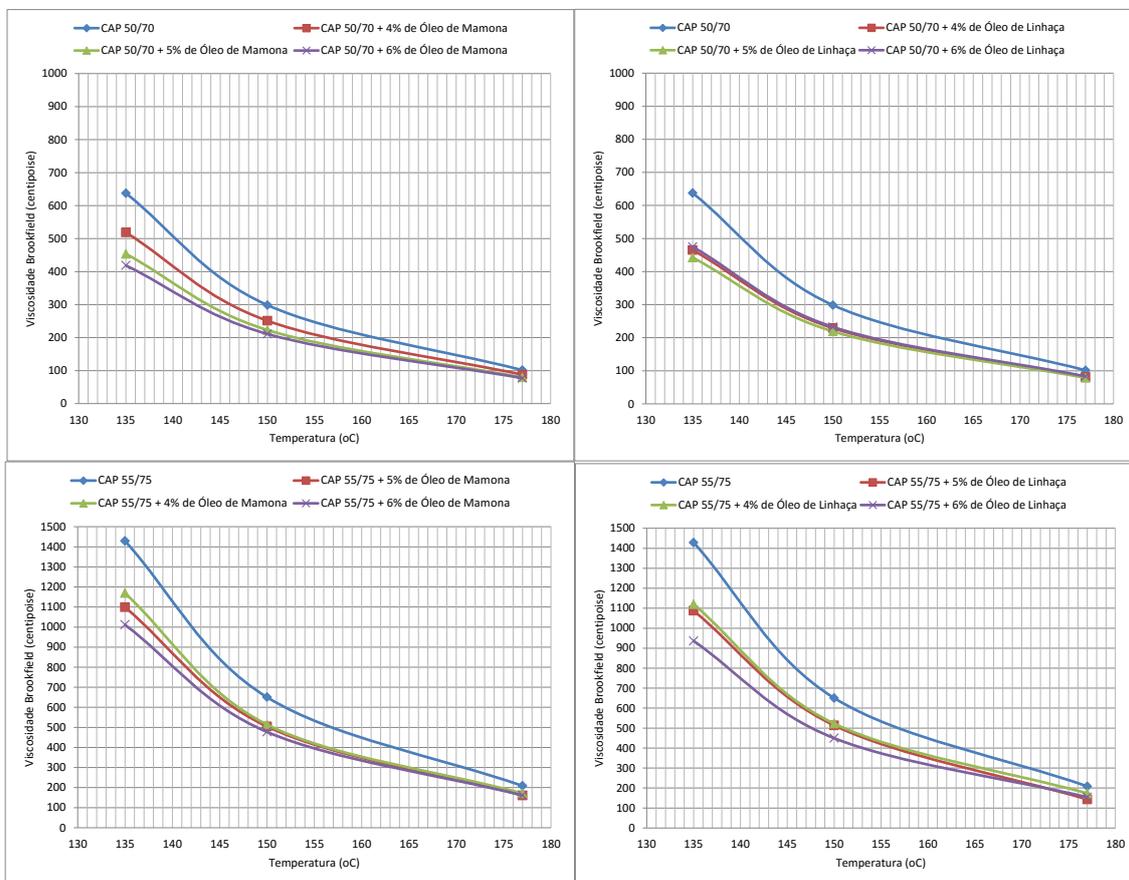


Figura 4.13: Resultados em gráfico de viscosidades rotacionais a 177°C para os ligantes após RTFO.



Na Figura 4.14 constam os resultados de viscosidade em gráfico sendo possível constatar reduções significativas de viscosidade em relação aos ligantes puros e modificado.

Figura 4.14: Viscosidades rotacionais nas diferentes temperaturas para os ligantes após RTFO.



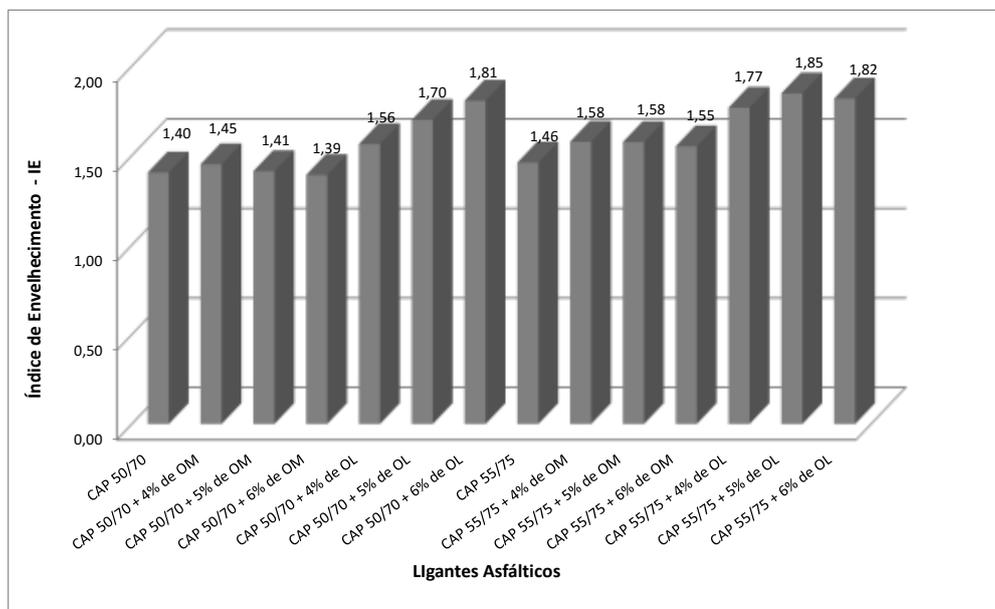
Foi determinado, para os ligantes ensaiados, o Índice de Envelhecimento (IE) obtido através da relação entre as viscosidades do CAP antes e após o envelhecimento o RTFO. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.8. Consta-se na referida tabela que o IE para os ligantes com adição dos óleos são maiores ao compará-lo com o CAP 50/70 e CAP 55/75-E nas condições puras. Neste aspecto, os resultados do OM e OL foram diferentes, ou seja, nas amostras com OM o índice de envelhecimento diminui na medida em que se aumenta o percentual nos ligantes puro e modificado. Em contraste, o índice de envelhecimento das amostras com OL aumenta em função do seu acréscimo percentual. No caso do OM o maior incremento de viscosidade após RTFO foi para a amostra de CAP 50/70 + 4% que resultou em 45% (IE = 1,45). O menor incremento com OM foi para a amostra de CAP 50/70 + 6% que resultou em 39% (IE = 1,39). Para o ligante modificado CAP 55/75 com adição de OM os índices de envelhecimento foram maiores que os obtidos para o ligante puro, apresentando para os percentuais de 4% e 5% o mesmo IE de 1,58.

Tabela 4.8: Resultados do Índice de Envelhecimento – (IE).

AMOSTRA	Viscosidade Brookfield (cP)		Índice de Envelhecimento - IE Após RTFOT/Antes RTFOT
	Temperatura (oC)		
	Antes	Após	
	135	135	
CAP 50/70	453,75	637,50	1,40
CAP 50/70 + 4% de Óleo de Mamona	357,50	518,75	1,45
CAP 50/70 + 5% de Óleo de Mamona	321,25	453,75	1,41
CAP 50/70 + 6% de Óleo de Mamona	301,00	418,75	1,39
CAP 50/70 + 4% de Óleo de Linhaça	303,75	465,00	1,53
CAP 50/70 + 5% de Óleo de Linhaça	273,75	442,50	1,62
CAP 50/70 + 6% de Óleo de Linhaça	245,00	475,00	1,94
CAP 55/75	978,50	1428,75	1,46
CAP 55/75 + 4% de Óleo de Mamona	741,25	1168,75	1,58
CAP 55/75 + 5% de Óleo de Mamona	697,50	1098,75	1,58
CAP 55/75 + 6% de Óleo de Mamona	651,75	1011,25	1,55
CAP 55/75 + 4% de Óleo de Linhaça	633,75	1120,00	1,77
CAP 55/75 + 5% de Óleo de Linhaça	588,75	1087,50	1,85
CAP 55/75 + 6% de Óleo de Linhaça	515,00	936,25	1,82

Para o OL os índices de envelhecimento foram maiores que os obtidos para os ligantes como OM. O CAP 50/70 + 6% apresentou um incremento de 81% (IE = 1,81) e o CAP 55/75 + 5% de 85% (IE = 1,85). O menor incremento de viscosidade para o OL foi obtido com o CAP 50/70 + 4% que resultou em 56% (IE = 1,56). Na Figura 4.15 consta graficamente o IE para os diferentes ligantes ensaiados.

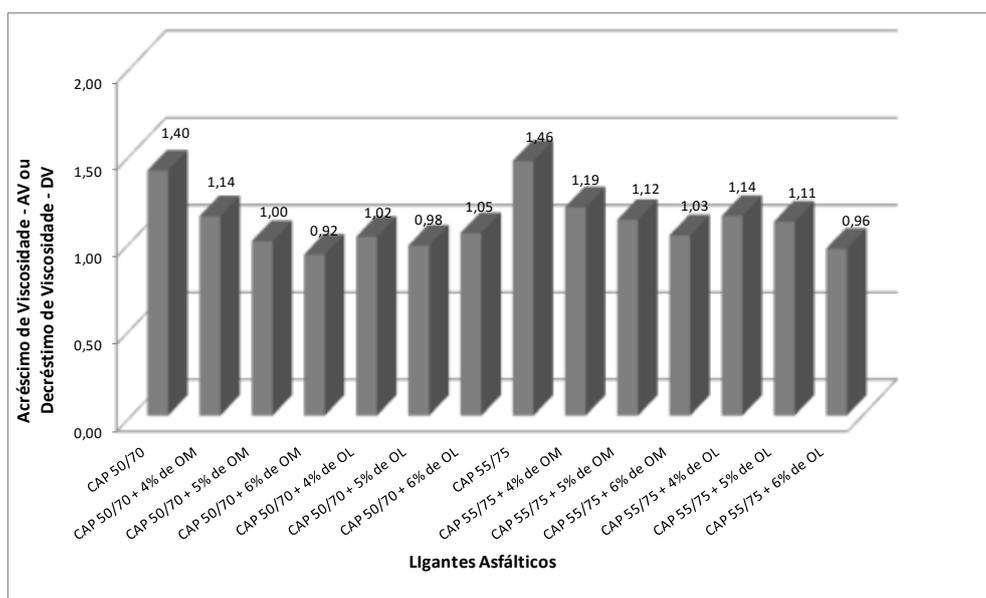
Figura 4.15: Resultados em gráfico do Índice de Envelhecimento – IE para temperatura de 135 °C.



Adicionalmente, ao compararmos as viscosidades antes e após o RTFO, neste caso, considerando o CAP 50/70 e o CAP 55/75 puros como referência é possível observar acréscimo de viscosidade – AV e

decréscimo de viscosidade - DV, conforme consta na Figura 4.16. Essa diferença é atribuída ao fato do IE considerar a relação entre viscosidades antes e após o RTFO tendo como referência os ligantes contendo adição dos óleos. De maneira oposta, o AV e o DV consideram o CAP puro como referência. Pode-se constatar que alguns ligantes resultaram em viscosidades após o RTFO menores que a do CAP puro. Em destaque para o CAP 50/70 + 6% de OM (DV=0,92) redução de 8% e para o CAP 55/75 + 6% de OL redução e 4% (DV=0,96). Os maiores acréscimos foram obtidos com o CAP 50/70 + 4% OM (AV=1,14) correspondendo a um acréscimo de 14% e para o CAP 55/75 + 4% OM (AV=1,19) correspondendo a um acréscimo de 19%.

Figura 4.16: Gráfico dos acréscimos de viscosidade - AV e decréscimos de viscosidade - DV.



Consubstanciado nos ensaios realizados, observa-se que os ligantes com adição do OL foram aqueles que tiveram uma maior perda de massa e conseqüentemente maior índice de envelhecimento. Esse fato pode ser atribuído, em princípio, a grande quantidade de ácidos graxos poliinsaturados presentes, em particular, em maiores proporções no OL em comparação aos demais oleaginosas. Esses ácidos são o oléico (C18:1), linoléico (C18:2) e linolênico (C18:3) que possuem configuração *cis*, dificultando o alinhamento dessas moléculas, resultando em interações intermoleculares mais fracas e conseqüentemente, menores viscosidades (HUI, 2006 apud MELO, 2010). Acrescenta Bailey (1996) que a ocorrência da degradação oxidativa está diretamente relacionada à disponibilidade de ar, temperatura e à presença de compostos insaturados nos óleos (BAILEY, 1996). Segundo Knothe (2006) os óleos vegetais compostos por ácidos graxos que apresentam polinsaturações são mais propensos aos processos oxidativos, principalmente aqueles com proporções variáveis dos ácidos oléico (C18:1), linoléico (C18:2) e linolênico (C18:3).

Segundo Melo (2010), o Óleo de Linhaça apresenta maiores percentuais de poliinsaturações, em torno de 80%, e o seu índice oxidativo é o maior dentre as oleaginosas. Neste sentido, a autora pondera que a diferença na proporção de ácidos graxos presentes nas amostras de óleos vegetais e de seus derivados influencia diretamente sua resistência a processos degradativos. A oxidação de óleos vegetais ocorrerá a diferentes velocidades, levando em consideração a quantidade e posição das insaturações na cadeia graxa. Compostos insaturados são significativamente mais susceptíveis à oxidação que os compostos saturados. Essa tendência à oxidação cresce na medida em que aumenta o grau de insaturação. Esse fato, de certo modo, justifica a maior perda de massa ocorrida pelos ligantes com OL após o envelhecimento a curto prazo.

Em contrapartida, apesar do OL apresentar uma maior oxidação e essa estar relacionada à grande quantidade de poliinsaturados, observa-se que era de se esperar resultados de penetração menores, maiores pontos de amolecimento e de viscosidade em comparação com os ligantes puros e com adição de OM. Porém, esse fato não ocorreu e, por este motivo, constata-se que o óleo de Linhaça atua como uma película protetora do ligante.

#### **4.1.7 Determinação das Temperaturas de Usinagem e de Compactação (TUC)**

Outro aspecto de suma importância é a obtenção das temperaturas de usinagem e compactação – TUC. O gráfico da curva logarítmica de viscosidade possibilita estabelecer as temperaturas ideais para a usinagem e compactação da massa asfáltica.

Ao conseguir reduções expressivas nas temperaturas de usinagem e compactação, vários benefícios podem ser obtidos e já expostos anteriormente no Capítulo II. A adição dos óleos de Mamona e de Linhaça se configurou, em potencial, vantajosa, pois as reduções na TUC foram significativas em relação ao CAP 50/70 e CAP 55/75, conforme apresentado na Tabela 4.9, sendo TL – temperatura do ligante, TA-temperatura do agregado e TC- temperatura de compactação.

Para mistura do óleo de Mamona adicionado ao CAP CAP 50/70, a redução máxima foi de 9,5°C para 6% de OM e para o CAP 55/75-E chegou-se a 8,0°C para o mesmo percentual. Para adição do OL o percentual de 6% adicionado ao CAP 50/70 chegou-se a 13,5°C e para o CAP 55/75-E 12,0°C.

Essas reduções são, de certo modo, bastante significativas haja vista que segundo Whiteoak (1990) o grau de oxidação é altamente dependente da temperatura, superfície e tempo de exposição e da espessura da película de ligante asfáltico. O autor ainda pondera que, a taxa de oxidação dobra a cada 10°C de aumento na temperatura do ligante acima dos 100°C. Ademais, outra vantagem do OL, além de reduzir a viscosidade do ligante, é também de protegê-lo, pois caso ocorra uma possível falta de calibração no momento da usinagem do concreto asfáltico há a possibilidade de um aumento na temperatura.

Tabela 4.9: Temperaturas de usinagem e compactação para os ligantes asfálticos.

AMOSTRA	TL Temperatura do Ligante	TA Temperatura do Agregado	TC Temperatura de Compactação	REDUÇÃO			
				T. USINAGEM		T. COMPACTAÇÃO	
				(%)	°C	(%)	°C
CAP 50/70	157,50	172,50	145,58	-	-	-	-
CAP 50/70 + 4% de OM	152,50	167,50	140,50	3,17	5,00	3,49	5,07
CAP 50/70 + 5% de OM	150,00	165,00	138,00	4,92	7,50	5,39	7,57
CAP 50/70 + 6% de OM	148,00	163,00	137,25	6,33	9,50	6,03	8,32
CAP 50/70 + 4% de OL	148,75	163,75	137,50	5,91	8,75	5,88	8,07
CAP 50/70 + 5% de OL	146,00	161,00	135,00	7,73	11,50	7,69	10,58
CAP 50/70 + 6% de OL	144,00	159,00	132,50	9,25	13,50	9,69	13,08
CAP 55/75	175,00	190,00	162,50	-	-	-	-
CAP 55/75 + 4% de OM	171,00	186,00	157,00	2,29	4,00	3,38	5,50
CAP 55/75 + 5% de OM	168,00	183,00	154,00	4,09	7,00	5,41	8,50
CAP 55/75 + 6% de OM	167,00	182,00	154,00	4,76	8,00	5,52	8,50
CAP 55/75 + 4% de OL	167,50	182,50	154,00	4,49	7,50	5,52	8,50
CAP 55/75 + 5% de OL	165,00	180,00	152,50	5,97	10,00	6,49	10,00
CAP 55/75 + 6% de OL	163,00	178,00	149,25	7,27	12,00	8,69	13,25

Os gráficos obtidos para a determinação das TUC para os ligantes ensaiados estão ilustradas nas Figuras de 4.17 a 4.20. Os gráficos foram confeccionados com o auxílio da utilização do viscosímetro rotacional nas seguintes temperaturas: 135°C, 150°C e 177°C. Para os ligantes ensaiados as faixas de viscosidade para a determinação da Temperatura de Usinagem (TU) foi de 1,5 a 1,9 Poise e para a Temperatura de Compactação (TC) foi de 2,5 a 3,1 Poise (ASTM D2493, 2001).

Figura 4.17: Curvas de variação da viscosidade rotacional em função da temperatura para o CAP puro com adição de óleo de Mamona

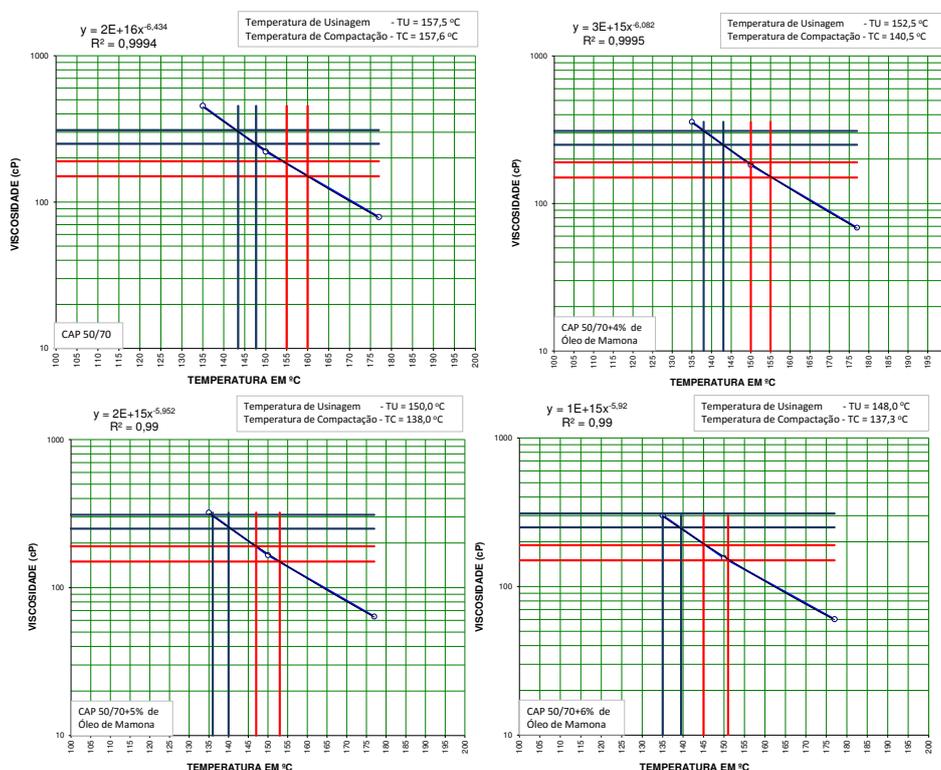


Figura 4.18: Curvas de variação da viscosidade rotacional em função da temperatura para o CAP puro com adição de óleo de Linhaça.

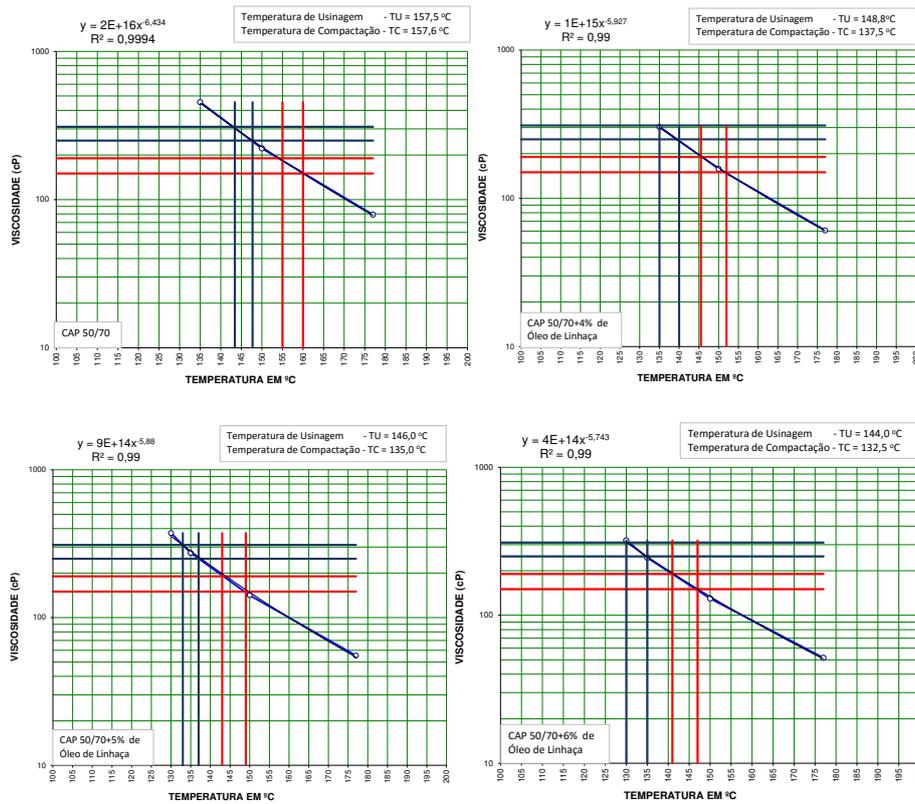


Figura 4.19: Curvas de variação da viscosidade rotacional em função da temperatura para o CAP modificado com adição de óleo de Mamona

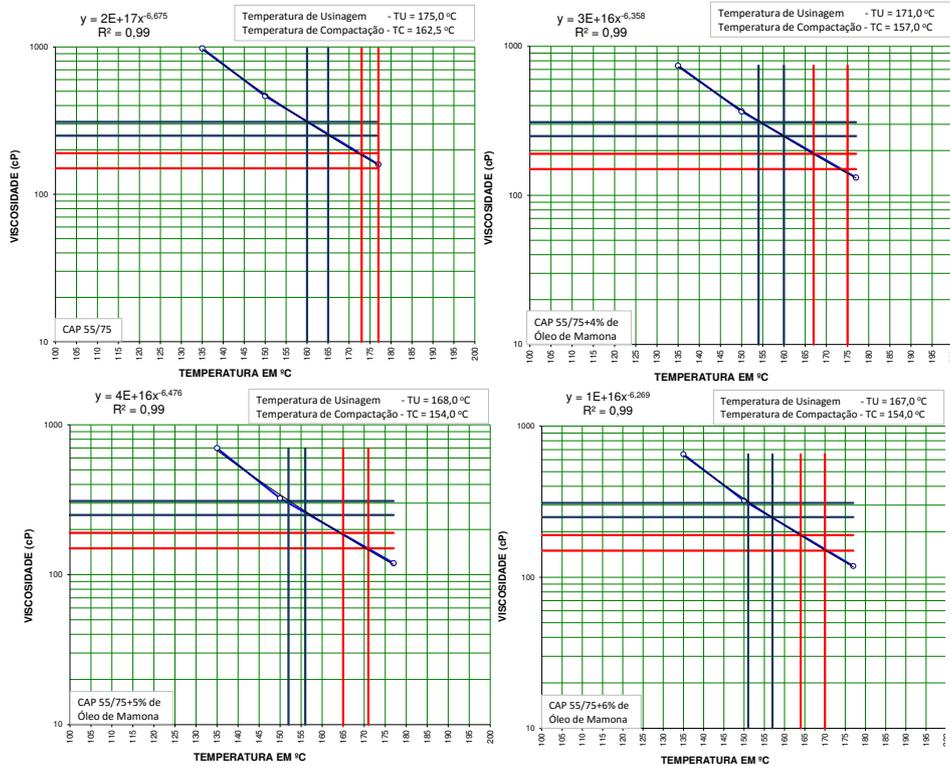
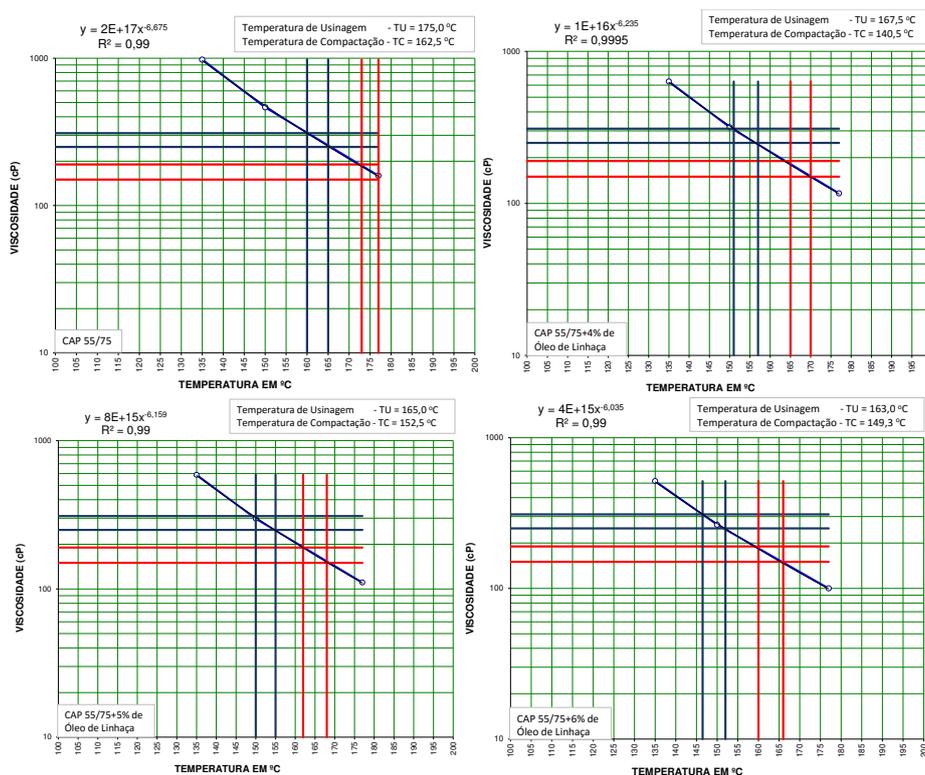


Figura 4.20: Curvas de variação da viscosidade rotacional em função da temperatura para o CAP modificado com adição de óleo de Linhaça.



## 4.2 Ensaios Reológicos com o auxílio do Reômetro de Cisalhamento Dinâmico – DSR

Neste item serão apresentados os resultados referentes ao desempenho reológico dos ligantes com o auxílio do reômetro de cisalhamento dinâmico – DSR, considerando as condições antes e após o RTFO. Uma das vantagens da caracterização reológica dos ligantes em testes conduzidos em DSR é o fato de se poder analisá-los em condições mais próximas as de sua aplicação ou uso em pavimentos. Assim, enquanto os testes convencionais são realizados a temperatura de 25°C, testes reológicos podem ser conduzidos a 60°C, considerada a temperatura típica de uso dos pavimentos e as frequências que podem ser relacionadas com as condições de tráfego nas quais os mesmos são submetidos. Análises do comportamento reológico do material nestas condições podem ser relacionadas ao desempenho esperado de forma mais confiável. Testes em varredura de temperatura permitem avaliar o efeito do clima, enquanto testes de frequência permitem avaliar o desempenho do material em diferentes condições de tráfego (FERNANDES, 2009).

### 4.2.1 Avaliação do Módulo de Cisalhamento Dinâmico (G\*) em função da variação de temperatura

O comportamento reológico dos ligantes puro e modificado com adição dos óleos de Mamona e de Linhaça foi avaliado com o auxílio dos parâmetros G\* e tanδ em DSR antes e após o RTFO. Considerando que o módulo complexo é um parâmetro que expressa a resistência a deformação do ligante ao ser submetido a uma carga cisalhante, é factível relacioná-lo com a consistência e viscosidade do ligante. Nesta perspectiva, uma análise dos resultados constantes na Tabela 4.10 e ilustrados nas

Figuras de 4.21 a 4.29 demonstram que os óleos ao interagirem com CAP puro e modificado interferiram em suas propriedades reológicas ocasionando um decréscimo significativo do  $G^*$  e esse mais evidente com o aumento da temperatura. Ainda, cabe destacar que o CAP 50/70 Puro apresentou maior  $G^*$  em comparação com o CAP 55/75 para temperaturas mais baixas e menores para temperaturas mais altas para ambas as condições antes e após o RTFO. Esse fato pode ser atribuído à melhoria proporcionada pelo polímero que possibilita uma maior resistência à deformações em altas temperaturas e mais flexibilidade a baixas temperaturas.

Tabela 4.10: Módulo Complexo ( $G^*$ ) versus temperatura antes e após o RTFO.

AMOSTRA	TEMPERATURA (°C)							TEMPERATURA (°C)						
	46	52	58	64	70	76	82	46	52	58	64	70	76	
	Módulo Complexo ( $G^*$ ) kPa - Antes do RTFOT							Módulo Complexo ( $G^*$ ) kPa - Após o RTFOT						
CAP 50/70	30,10	11,10	4,36	1,85	0,84	-	-	66,00	24,20	9,43	3,89	1,71	-	
CAP 50/70 + 4% de OM	14,50	5,56	2,28	1,01	0,49	-	-	34,40	13,00	5,23	2,25	1,01	-	
CAP 50/70 + 5% de OM	9,60	3,62	1,47	0,65	-	-	-	26,10	9,90	4,03	1,73	-	-	
CAP 50/70 + 6% de OM	8,85	3,32	1,34	0,59	-	-	-	17,80	6,94	2,87	1,27	-	-	
CAP 50/70 + 4% de OL	9,67	3,85	1,65	0,76	-	-	-	30,60	11,60	4,64	1,97	-	-	
CAP 50/70 + 5% de OL	9,98	4,00	1,72	0,79	-	-	-	20,70	8,01	3,29	1,44	-	-	
CAP 50/70 + 6% de OL	5,49	2,29	1,01	0,48	-	-	-	23,30	8,99	3,69	1,60	-	-	
CAP 55/75	26,70	11,40	5,18	2,52	1,29	0,69	-	47,70	20,10	9,04	4,35	2,21	1,19	
CAP 55/75 + 4% de OM	10,40	5,47	2,69	1,36	0,72	0,40	0,24	22,60	10,20	4,83	2,42	1,27	-	
CAP 55/75 + 5% de OM	11,30	5,08	2,45	1,25	0,67	-	-	17,00	7,66	3,67	1,85	-	-	
CAP 55/75 + 6% de OM	10,20	4,69	2,29	1,17	0,62	-	-	17,50	7,92	3,81	1,94	-	-	
CAP 55/75 + 4% de OL	8,40	3,91	1,93	1,01	0,55	-	-	27,90	12,40	5,87	2,94	1,54	-	
CAP 55/75 + 5% de OL	11,20	5,19	2,54	1,31	0,71	-	-	17,80	7,95	3,80	1,91	-	-	
CAP 55/75 + 6% de OL	5,95	2,87	1,46	0,77	-	-	-	18,10	8,21	3,96	2,00	-	-	

#### Avaliação antes do RTFO

Observa-se na Figura 4.21 que o  $G^*$  do ligante CAP 50/70 + 4 % de OM resultou superior em comparação com 5 % e 6 % que foram praticamente iguais para todas as faixas de temperatura. Porém, relativamente ao CAP 55/75 os módulos complexos sofrem diminuta variação para esse ligante com adição dos percentuais de 4 %, 5 % e 6 % de OM, como ilustrado na Figura 4.22.

Figura 4.21: Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura – CAP 50/70 + OM antes do RTFO.

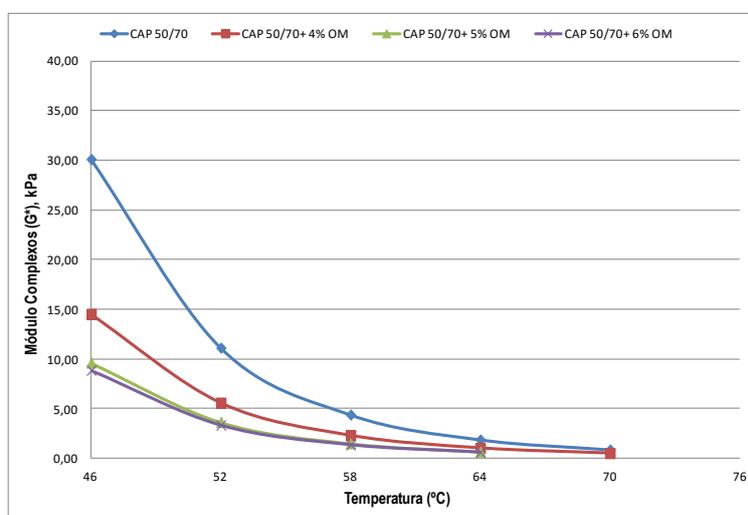


Figura 4.22: Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura – CAP 55/75 + OM antes do RTFO.

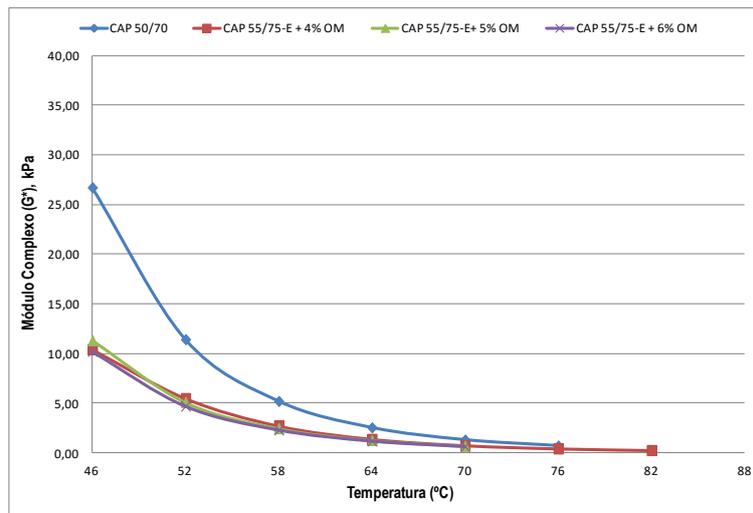
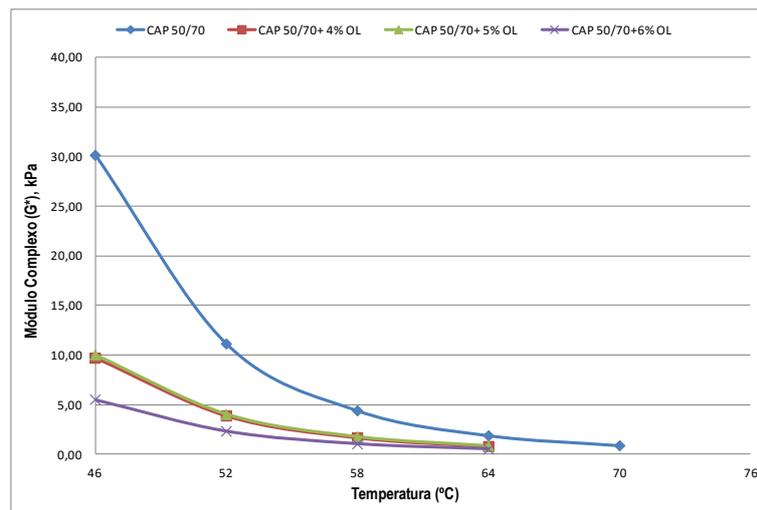
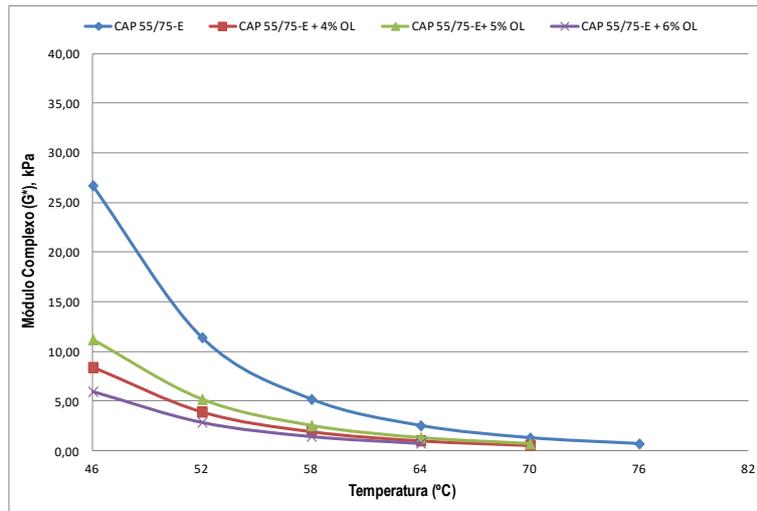


Figura 4.23: Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura – CAP 50/70 + OL antes do RTFO.



Para os ligantes com adição de OL, no caso do CAP 50/70, os módulos complexos para os percentuais de 4% e 5% adicionados foram praticamente iguais, tendo o percentual com 6% o de menor  $G^*$  (Figura 4.23). Entretanto, com relação ao CAP 55/75 o percentual de 5% de OL foi o que resultou em maior  $G^*$ , seguido de 4% e após 6% (Figura 4.24).

Figura 4.24: Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura – CAP 55/75 + OL antes do RTFO.



#### Avaliação após o RTFO

Após o procedimento de envelhecimento com auxílio do RTFO verifica-se nas Figuras 4.25 e na 4.26 que os módulos complexos tiveram um ganho de rigidez refletido pelo efeito oxidativo simulado. Para os ligantes CAP 50/70 e CAP 55/75 com adição de OM o percentual de 4% foi aquele que resultou em maior  $G^*$ , seguido de 5% e após 6%.

Do mesmo modo, para os ligantes com adição de OL o maior  $G^*$  foi obtido com o percentual de 4%, seguido de 5% e após 6% para ambos os CAPs 50/70 e 55/75, conforme evidenciado nas Figuras 4.27 e 4.28.

Figura 4.25: Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura – CAP 50/70 + OM após o RTFO.

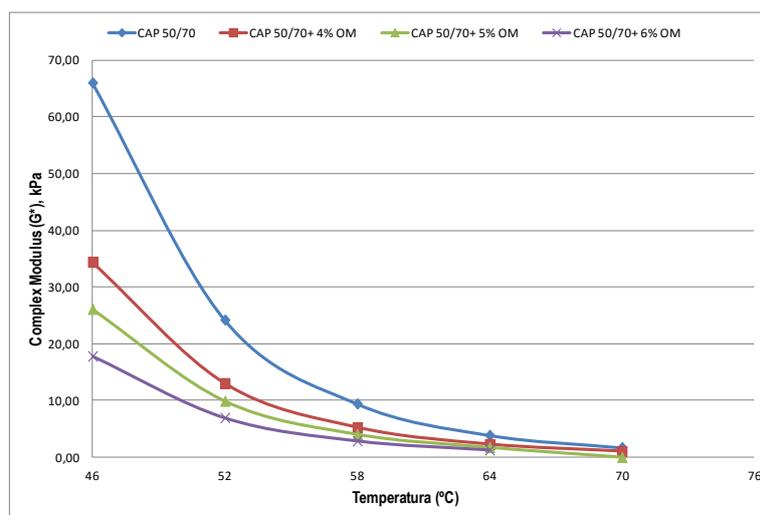


Figura 4.26: Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura – CAP 55/75 + OM após RTFO.

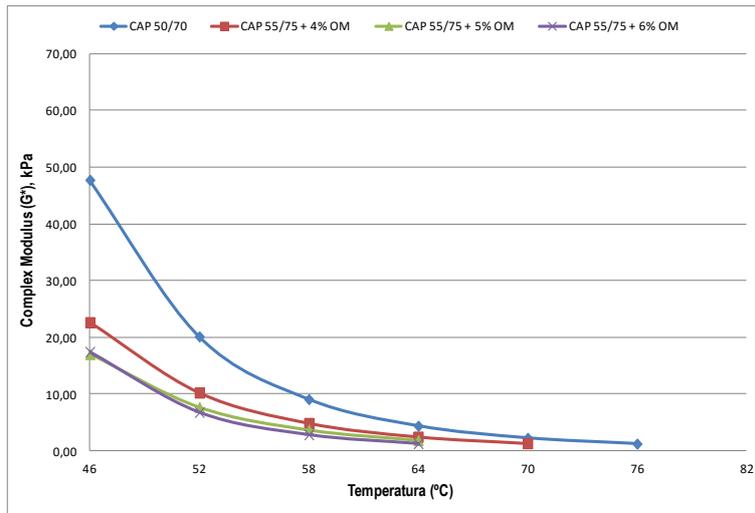


Figura 4.27: Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura – CAP 50/70 + OL após o RTFO.

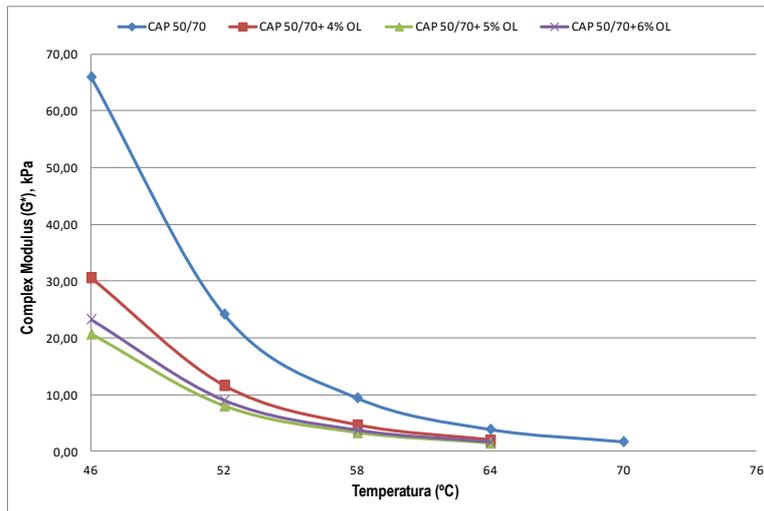
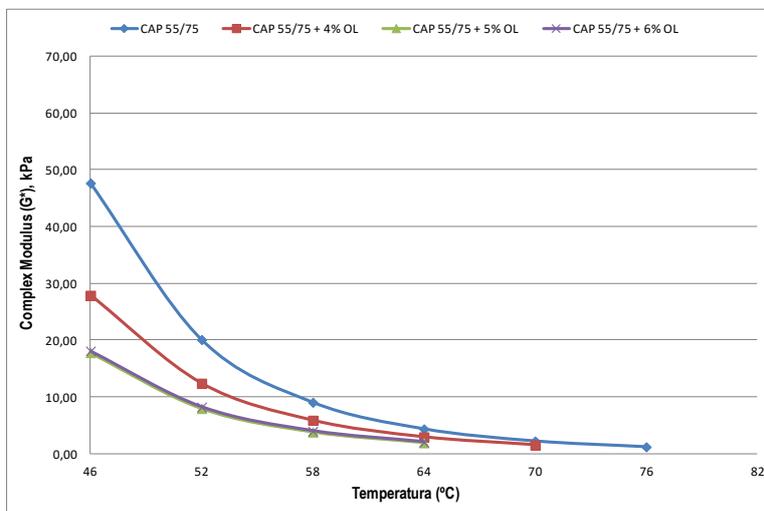


Figura 4.28: Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura – CAP 55/75 + OL após o RTFO.



#### 4.2.2 Grau de Desempenho – PG

O grau de desempenho - PG de um ligante é definido por dois números representativos da faixa de temperatura (máxima e mínima) em que o ligante poderá ser utilizado. Sendo essas duas temperaturas aquelas que possibilitam o ligante ser utilizado mantendo seu desempenho satisfatório. O grau de desempenho – PG dos ligantes asfálticos foram obtidos com base nos valores do parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$ , isto é, a temperatura máxima do PG foi definida como a temperatura na qual os valores do  $G^*/\text{sen}\delta$  são superiores a 1,0 kPa e a 2,2 kPa, respectivamente para as amostras antes e após o envelhecimento a curto prazo. Sendo assim, estes valores são capazes de garantir a adequada resistência ao acúmulo de deformações permanentes.

O programa SHRP adotou a relação  $G^*/\text{sen}\delta$  como critério para expressar a resistência do ligante à deformação permanente. A determinação deste parâmetro é feita basicamente através da avaliação da amostra antes e após envelhecimento em RTFO, em teste de varredura de temperatura no DSR, a uma frequência de 10 rad/s e deformação de 12 %, nas temperaturas de 46 a 82°C.

Consoante os resultados contidos na Figura 4.37 constata-se que o PG do CAP puro e adicionado aos óleos de Mamona e de Linhaça, inexoravelmente, se manteve o mesmo independente do envelhecimento a curto prazo com o auxílio do RTFO. Destacando-se a temperatura de 64°C para o CAP 50/70 e CAP 50/70+4% de OM e 58°C para as demais amostras com os óleos de Mamona e de Linhaça como sendo aquela que apresenta as propriedades reológicas adequadas.

Para as misturas dos óleos de Mamona e de Linhaça adicionadas ao CAP 55/75 ocorreu uma queda no PG dos ligantes em comparação com as amostras relativas ao CAP 50/70 Puro.

Nas Figuras 4.29 e 4.32 constam os gráficos com a variação do  $G^*/\text{Sen}\delta$  em função da temperatura, antes do envelhecimento a curto prazo para o CAP 50/70 e CAP 55/75 com adição dos óleos de Mamona e de Linhaça. No geral, observa-se uma redução do parâmetro  $G^*/\text{Sen}\delta$  em função da temperatura com adição dos óleos em razão do efeito plastificante desses que, por consequência, diminuem a resistência à deformação do ligante.

Observa-se na Figura 4.29 e na Figura 4.30 que a adição do OM ocasionou uma redução dos valores de  $G^*/\text{Sen}\delta$  no CAP puro e modificado, indicando assim, uma menor resistência à deformação permanente. Os ligantes CAP 50/70 + 5% e 6% de OM apresentaram praticamente os mesmos valores de  $G^*/\text{Sen}\delta$  enquanto que, o CAP 50/70 + 4% foi relativamente superior. A redução dos valores de  $G^*/\text{Sen}\delta$  a partir do acréscimo do OM pode estar associada à propriedade do óleo em reduzir a viscosidade do ligante e, por consequência, sua resistência à deformação permanente e com isso um menor PG.

Para os ligantes com adição do OL o comportamento foi similar aos ligantes com o OM, ou seja, apresentou menores valores de  $G^*/\text{sen}\delta$  em relação ao CAP puro e modificado. Porém, os valores de  $G^*/\text{sen}\delta$  para os percentuais de 4% e 5% de OL adicionados ao CAP 50/70 resultaram praticamente iguais, conforme o gráfico da Figura 4.31. E na Figura 4.32, após o CAP 55/75, o maior valor de  $G^*/\text{sen}\delta$  foi obtido com 5% de OL adicionado ao referido CAP modificado.

Figura 4.29: Parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  em função da temperatura do CAP 50/70 + OM antes RTFO.

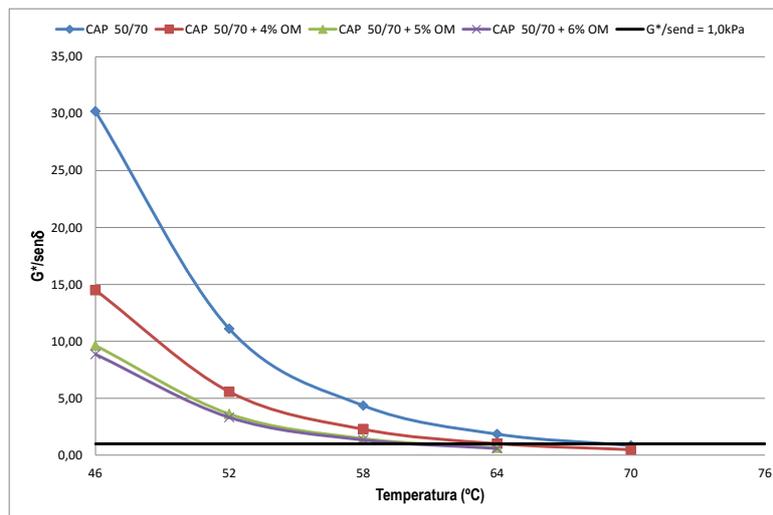


Figura 4.30: Parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  em função da temperatura – CAP 55/75 + OM antes RTFO.

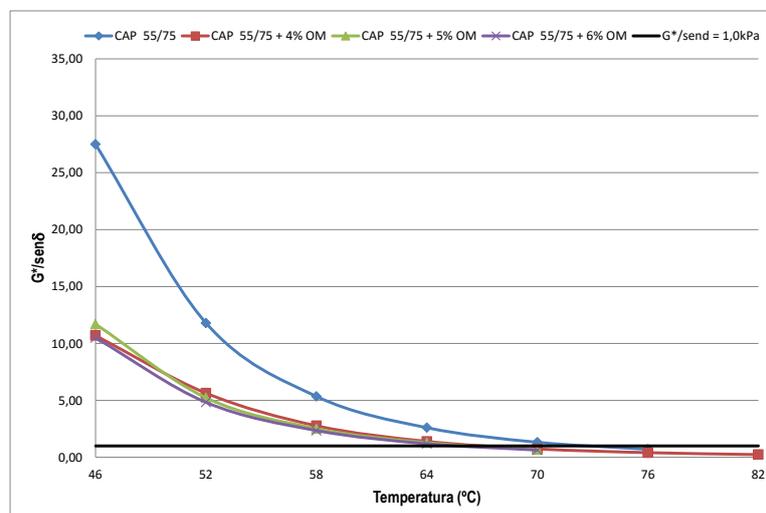


Figura 4.31: Parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  em função da temperatura – CAP 50/70 + OL antes RTFO.

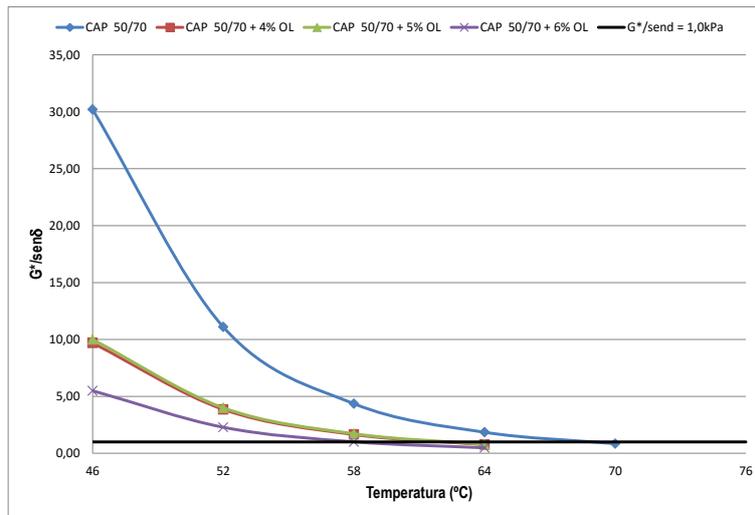
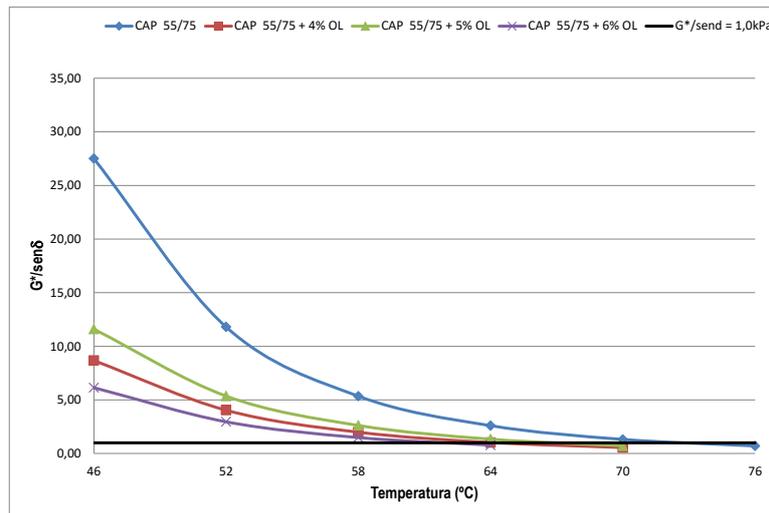


Figura 4.32: Parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  em função da temperatura – CAP 55/75 + OL antes RTFO.



Para todos os ligantes asfálticos ensaiados, após o RTFO, constata-se um aumento do valor da razão  $G^*/\text{sen}\delta$  para qualquer temperatura, o que está certamente vinculado ao acréscimo do teor de asfaltenos resultante do processo de oxidação.

No caso dos ligantes com adição de OM, conforme Figuras 4.33 e 4.34, o CAP puro e modificado apresentaram maiores valores de  $G^*/\text{sen}\delta$ . Para o CAP puro e modificado com adição do OM o maior valor de  $G^*/\text{sen}\delta$  foi obtido com 4%.

Os ligantes com OL também apresentaram menores valores de  $G^*/\text{sen}\delta$  quando comparado com os CAPS puro e modificado. Do mesmo modo, o maior valor obtido de  $G^*/\text{sen}\delta$  com adição de OL foi atingido com 4% para os CAPs puro e modificado conforme Figuras 4.35 e 4.36.

Figura 4.33: Parâmetro  $G^* / \text{sen} \delta$  em função da temperatura – CAP 50/70 + OM após RTFO.

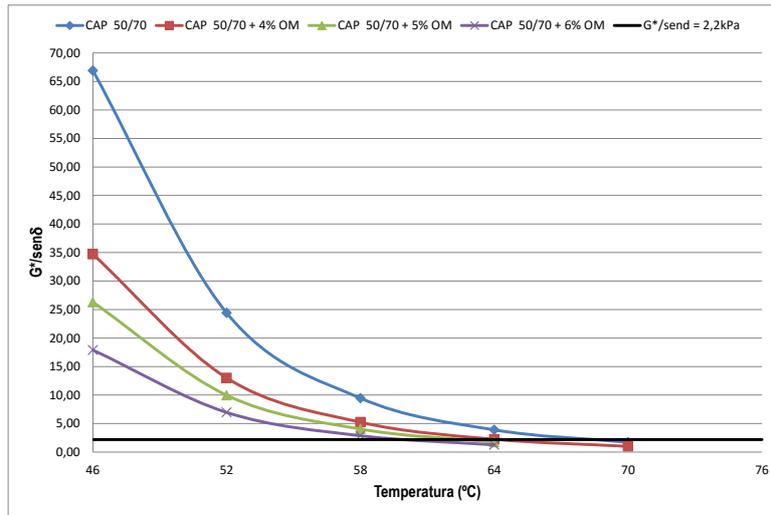


Figura 4.34: Parâmetro  $G^* / \text{sen} \delta$  em função da temperatura – CAP 55/75 + OM após RTFO.

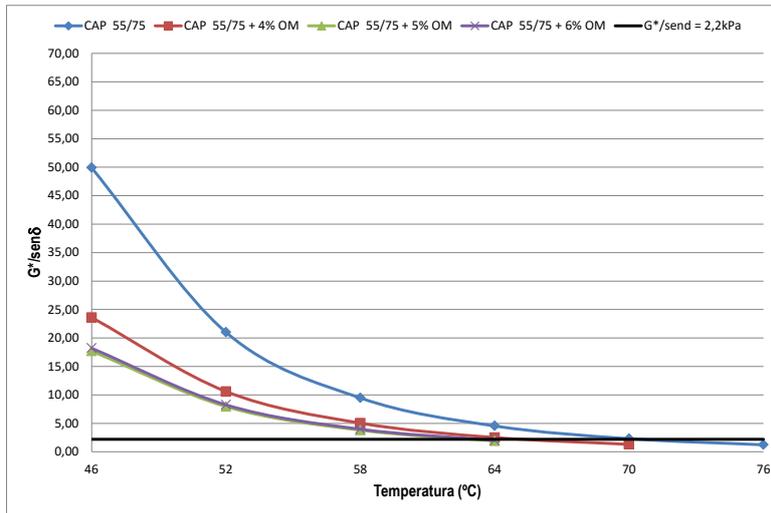


Figura 4.35: Parâmetro  $G^* / \text{sen} \delta$  em função da temperatura – CAP 50/70 + OL após RTFO.

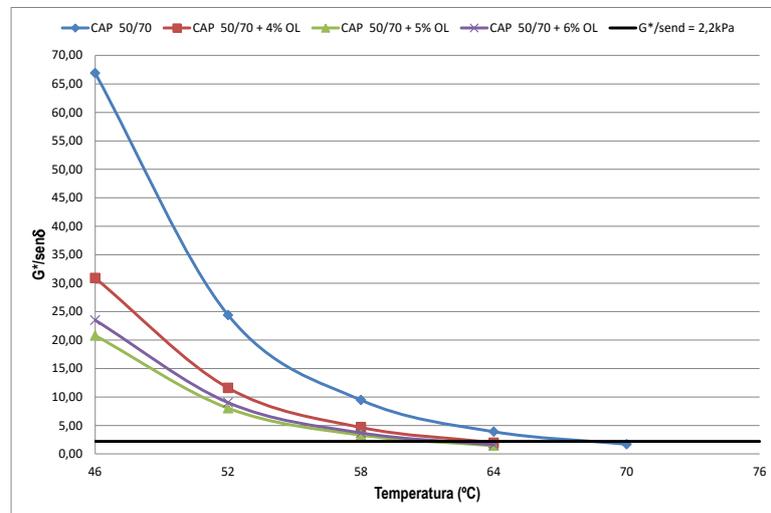


Figura 4.36: Parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  em função da temperatura – CAP 55/75 + OL após RTFO.

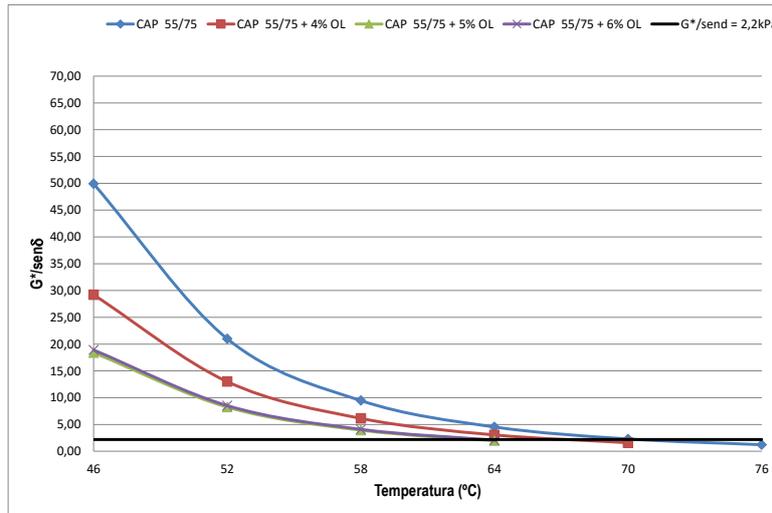
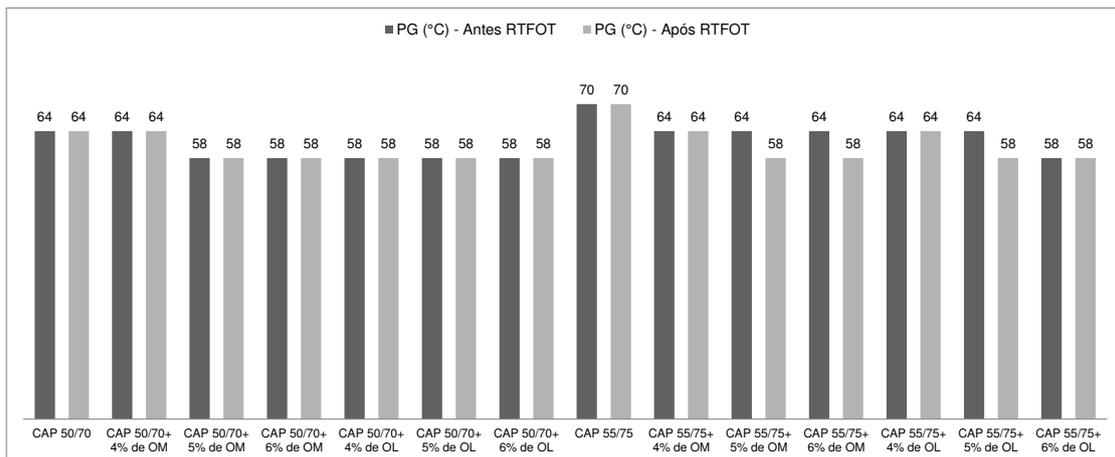


Figura 4.37: Grau de Desempenho (PG) do CAP puro e modificado com adição dos óleos de Mamona e de Linhaça.



#### 4.2.3 Avaliação do parâmetro $\text{tan}\delta$ em função da variação de temperatura

A tangente de delta ( $\text{tan}\delta$ ) é um importante parâmetro reológico para o ligante asfáltico e esta medição é geralmente utilizada por ser mais sensível à estrutura física e química do que o módulo complexo. Além disto, a  $\text{tan}\delta$  é proporcional à relação da energia dissipada e armazenada, isto é, à relação dos componentes viscosos e elásticos do material (BRINGEL, 1997).

Quanto mais elástico o material, mais o valor de  $\text{tan}\delta$  se aproxima de zero. Enquanto maiores valores de  $\text{tan}\delta$  demonstram caráter mais viscoso. O deslocamento do ângulo de fase é uma medida da elasticidade presente na amostra. Um material é igualmente elástico e viscoso se  $\delta = 45^\circ$  ou  $\text{tan}\delta = 1$  (ALENCAR, 2009). Nesse sentido, o CAP puro e modificado sem adição dos óleos resultaram em menores valores de  $\text{tan}\delta$  denotando assim um melhor comportamento em termos elásticos.

Na verdade, o efeito dos óleos nos ligantes puros e modificados é apenas na redução de suas respectivas viscosidades, bem como, proporcionar uma relativa proteção contra o envelhecimento oxidativo. Essa proteção ficou evidenciada nos resultados obtidos de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional. Por este motivo, em princípio, não é de se esperar uma melhoria em termos elásticos. Na Tabela 4.11 são apresentados dos resultados da  $\tan\delta$  em função da variação de temperatura.

Tabela 4.11:  $\tan\delta$  versus temperatura antes e após o RTFO.

AMOSTRA	TEMPERATURA (°C)							TEMPERATURA (°C)					
	46	52	58	64	70	76	82	46	52	58	64	70	76
	$\tan\delta$ - Antes do RTFOT							$\tan\delta$ - Após o RTFOT					
CAP 50/70	10,20	15,06	23,87	38,21	71,68			5,85	8,15	11,91	17,89	28,65	
CAP 50/70 + 4% de OM	14,67	22,03	35,82	63,71	95,60			7,12	10,20	15,06	23,87	40,94	
CAP 50/70 + 5% de OM	16,84	26,04	44,09	81,93				7,81	11,21	16,84	27,28		
CAP 50/70 + 6% de OM	17,35	27,28	47,77	81,93				9,85	14,30	22,03	35,82		
CAP 50/70 + 4% de OL	15,47	23,87	38,21	71,68				7,40	10,58	15,90	24,91		
CAP 50/70 + 5% de OL	14,30	20,45	30,16	44,09				9,36	13,62	21,21	35,82		
CAP 50/70 + 6% de OL	19,75	31,83	57,33	95,60				7,92	11,43	17,35	27,28		
CAP 55/75	3,98	3,87	3,87	4,04	4,44	5,05		3,29	3,27	3,27	3,33	3,53	3,89
CAP 55/75 + 4% de OM	4,01	3,95	4,04	4,37	4,96	5,79	6,86	3,35	3,40	3,42	3,58	3,92	
CAP 55/75 + 5% de OM	4,04	4,01	4,13	4,47	5,10			3,68	3,63	3,71	3,95		
CAP 55/75 + 6% de OM	4,04	4,01	4,17	4,55	5,24			3,40	3,42	3,51	3,76		
CAP 55/75 + 4% de OL	3,95	3,95	4,17	4,59	5,29			3,23	3,23	3,29	3,44	3,76	
CAP 55/75 + 5% de OL	3,76	3,76	3,92	4,26	4,87			3,61	3,61	3,68	3,95		
CAP 55/75 + 6% de OL	3,95	4,07	4,37	4,92				3,49	3,51	3,63	3,89		

#### Avaliação antes do RTFO

Nas Figuras 4.38 e na 4.39 constam os resultados do parâmetro em análise dos quais se pode extrair que para o CAP 50/70 com adição do OM os valores apresentaram variação nas temperaturas mais baixas quando comparados aos obtidos com o CAP 55/75. O percentual com 4% foi aquele que resultou em menores valores de  $\tan\delta$  para ambos os CAPs 50/70 e 55/75.

Para os ligantes com a adição do OL, constantes nas Figuras 4.40 e na 4.41, observa-se o mesmo comportamento constatado com o OM no que diz respeito a variação nas temperaturas mais baixas para o CAP 50/70 e pouca variação para o CAP 55/75. O percentual de 5% de OL apresentou os menores valores de  $\tan\delta$ . Outro aspecto a destacar são os menores valores de  $\tan\delta$  obtidos com adição de OM e OL ao CAP 55/75 que de fato por ser modificado por polímero possui características elásticas significativamente superiores ao CAP 50/70. Esse efeito é conferido ao fato dos óleos plastificarem o ligante reduzindo sua viscosidade e possibilitando uma maior atuação da rede polimérica no ligante. Ademais, foram obtidos para o CAP 55/75 menores variações da  $\tan\delta$  para os três percentuais de OM e OL pesquisados em comparação com o CAP 50/70.

Figura 4.38: Parâmetro  $\tan \delta$  em função da temperatura – CAP 50/70 + OM antes do RTFO.

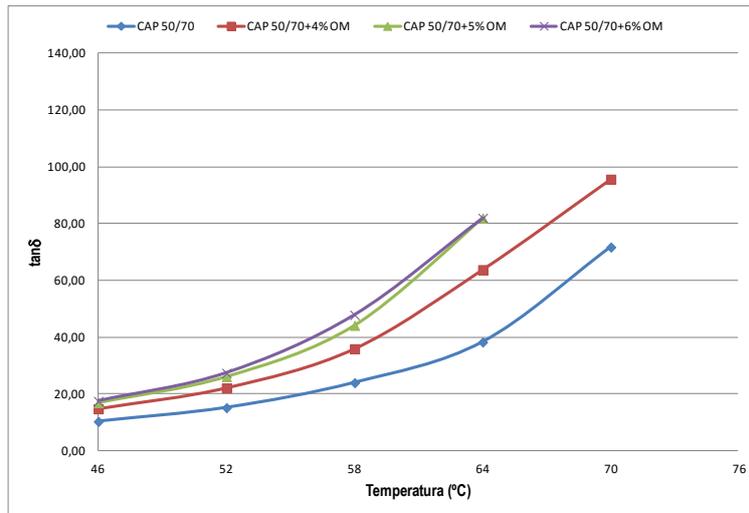


Figura 4.39: Parâmetro  $\tan \delta$  em função da temperatura – CAP 55/75 + OM antes do RTFO.

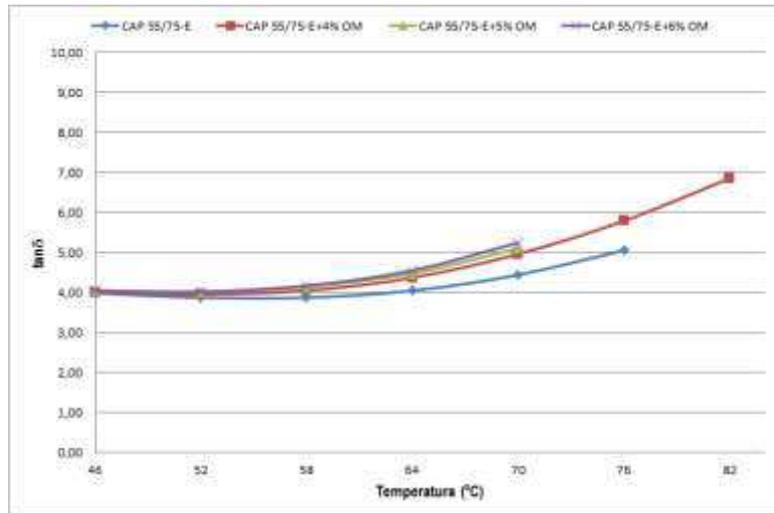


Figura 4.40: Parâmetro  $\tan \delta$  em função da temperatura – CAP 50/70 + OL antes do RTFO.

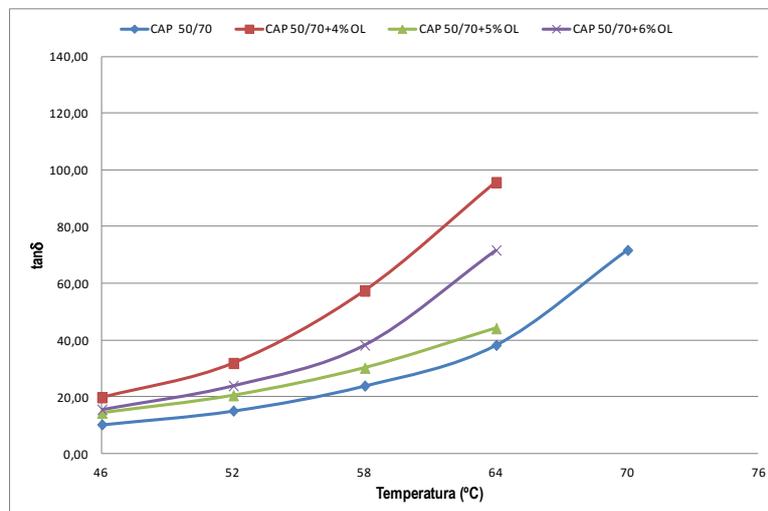
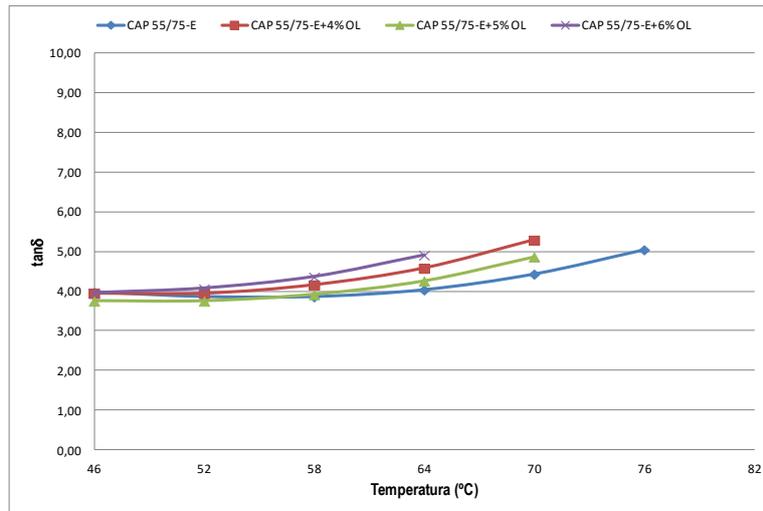


Figura 4.41: Parâmetro  $\tan\delta$  em função da temperatura – CAP 55/75 + OL antes do RTFO.



#### Avaliação após o RTFO

Os resultados apontaram uma significativa diminuição da  $\tan\delta$  para ambos os CAPs com adição dos percentuais de OM e OL nas temperaturas mais baixas, conforme exposto nas Figuras 4.42 a 4.45.

Em distinção para o CAP 55/75 que apresentou após procedimento RTFO para os três percentuais de OM valores praticamente iguais evidenciados na Figura 4.44.

Observa-se ainda ao comparar os resultados do CAP 50/70 com os obtidos para o CAP 55/75 um incremento contínuo da  $\tan\delta$  com o aumento da temperatura indicando, assim, uma perda gradativa da elasticidade do material, ao contrário do CAP 55/75, cujos valores sofreram pouca variação em função da temperatura.

Figura 4.42: Parâmetro  $\tan\delta$  em função da temperatura – CAP 50/70 + OM após o RTFO.

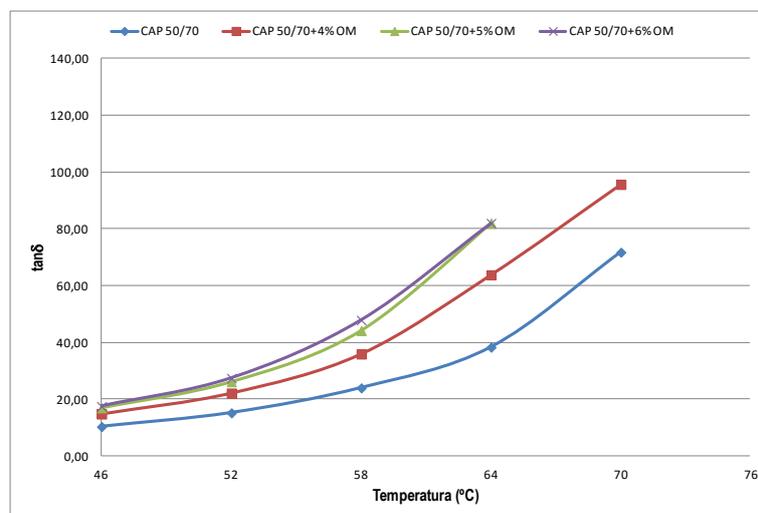


Figura 4.43: Parâmetro  $\tan \delta$  em função da temperatura – CAP 50/70 + OL após o RTFO.

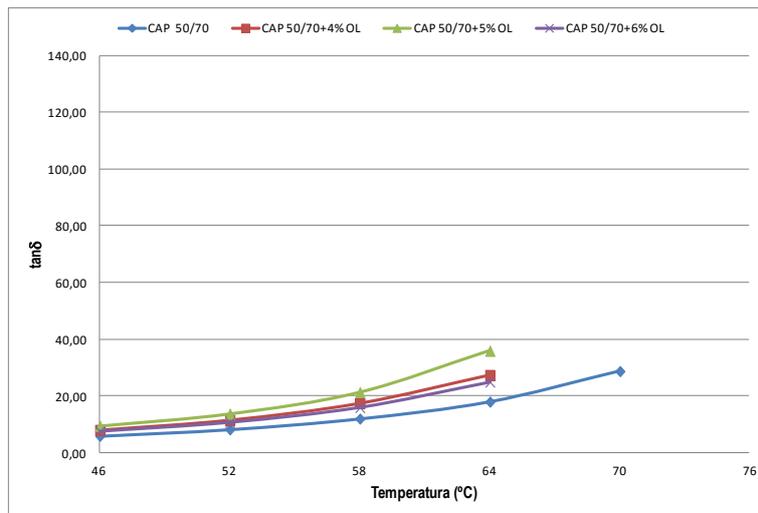


Figura 4.44: Parâmetro  $\tan \delta$  em função da temperatura – CAP 55/75 + OM após o RTFO.

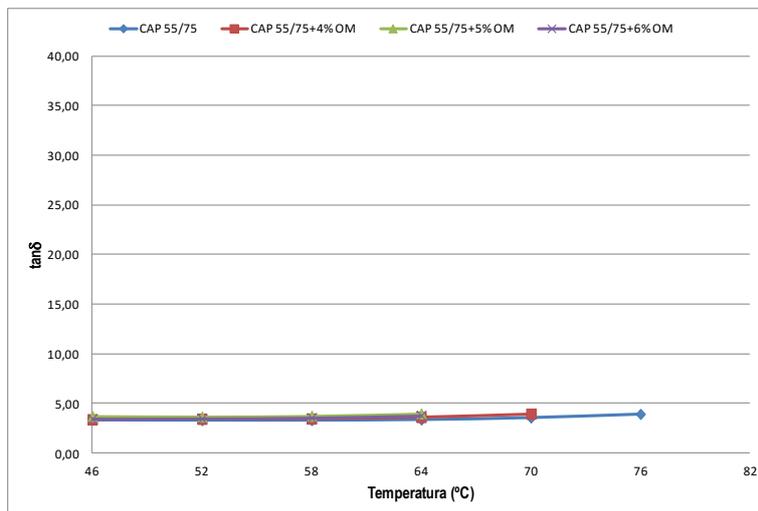
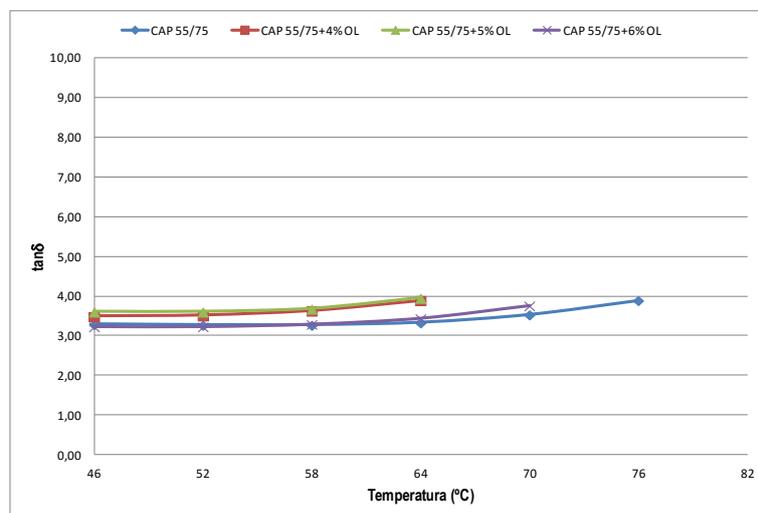


Figura 4.45: Parâmetro  $\tan \delta$  em função da temperatura – CAP 55/75 + OL após o RTFO.



#### 4.2.4 Avaliação do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da varredura de frequência

A curva mestra possibilita o estudo do comportamento reológico de ligantes asfálticos em função da frequência (ou tempo) de carregamento representando a variação da propriedade reológica, em uma dada temperatura e um amplo espectro de frequência (BECHARA et. al. 2008).

Segundo Fernandes (2009), a curva mestra permite a avaliação do efeito da modificação e do uso de diferentes aditivos no comportamento reológico dos ligantes, sendo importante salientar que frequências baixas guardam uma correlação direta com maiores tempos de aplicação do esforço e temperaturas mais altas, enquanto frequências mais elevadas, com tempos menores e temperaturas mais baixas.

Na Figura 4.46 constam as curvas mestras do CAP puro e com adições de OM. Observa-se um comportamento característico expresso pelo aumento da rigidez com o incremento da frequência de carregamento. Diversamente, da variação de  $G^*$  em função da temperatura, em função da frequência os resultados indicaram melhores resultados de  $G^*$  para os CAPs 50/70 e 55/75 com adições dos óleos de Mamona e de Linhaça. Ainda, constata-se um comportamento similar entre as amostras com adição de 5% e 6% de OM, seguido do CAP puro e após pela adição de 6% de OM. Este fato pode ser atribuído a uma menor susceptibilidade das amostras com adições dos óleos em função da varredura de frequência.

Na Figura 4.48 contendo todas as curvas mestras para o CAP puro e com adições de OM e OL, observa-se que os maiores valores de  $G^*$  foram obtidos para a adição de 4% de OL, seguidos de 6% e 5% de OM.

Do mesmo modo, na Figura 4.51 constam todas as curvas mestras para o CAP com polímero SBS (CAP 55/75) e adições de OM e OL, sendo possível identificar que os maiores  $G^*$  foram obtidos para os percentuais de 5% e 6% de OM, seguidos de 5% de OL.

Figura 4.46: Curva mestra do CAP 50/70 com adições de Óleo de Mamona.

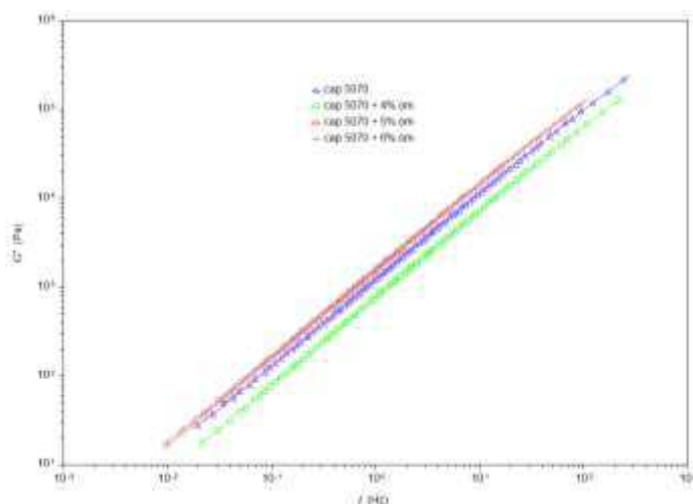


Figura 4.47: Curva mestra do CAP 50/70 com adições de Óleo de Linhaça.

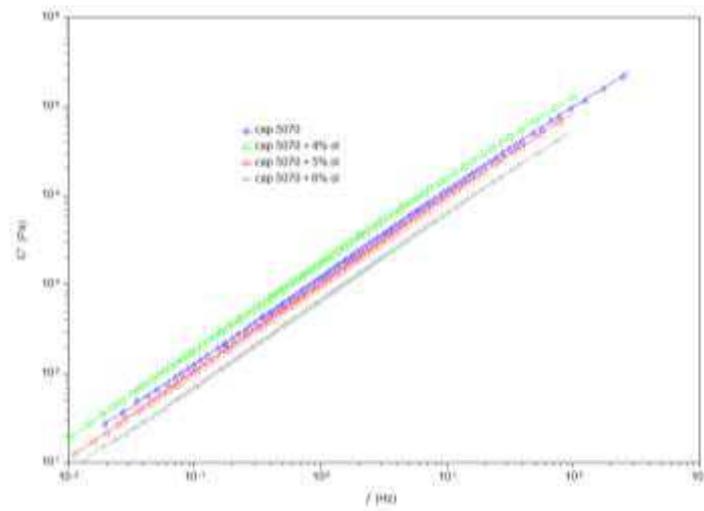


Figura 4.48: Curva mestra do CAP 50/70 com adições de Óleo de Mamona e de Linhaça.

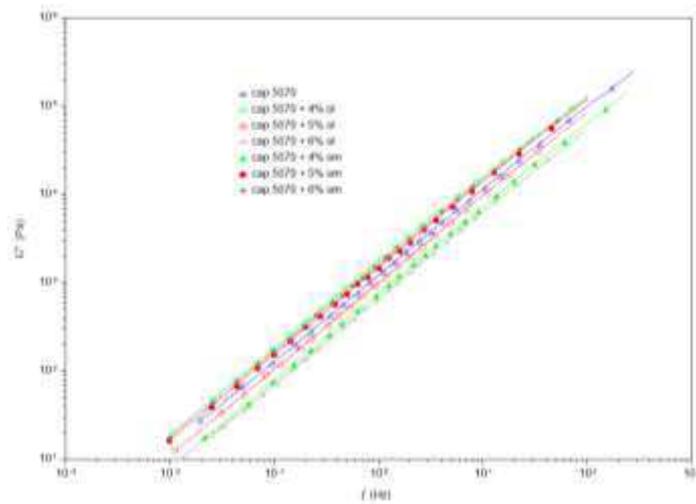


Figura 4.49: Curva mestra do CAP 55/75 com adições de Óleo de Mamona.

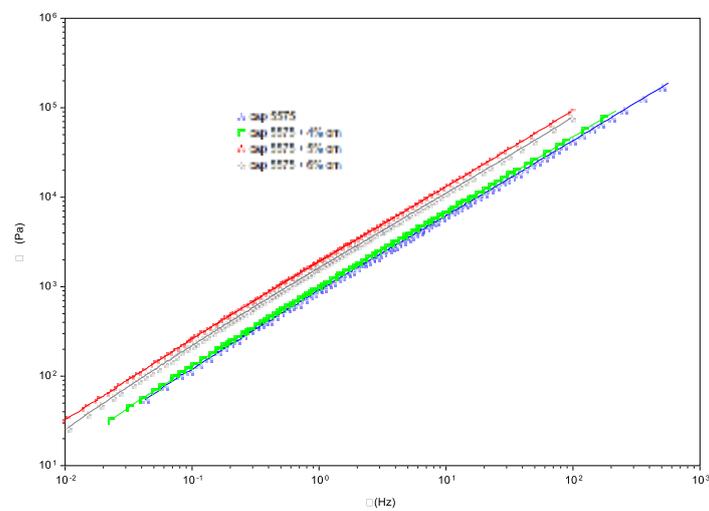


Figura 4.50: Curva mestra do CAP 55/75 com adições de Óleo de Linhaça.

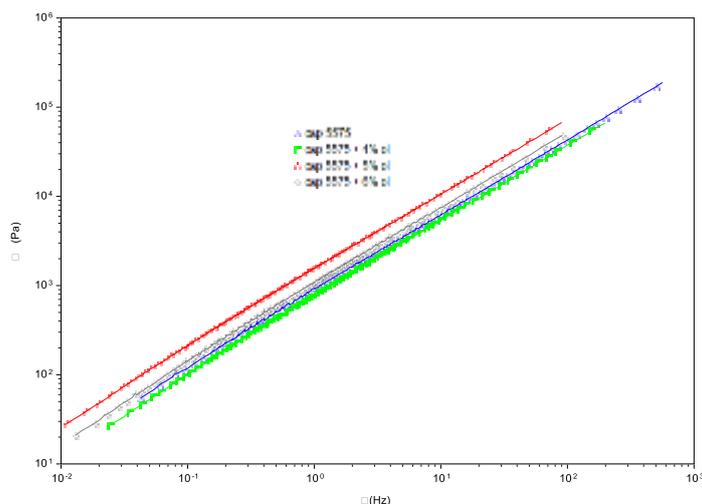
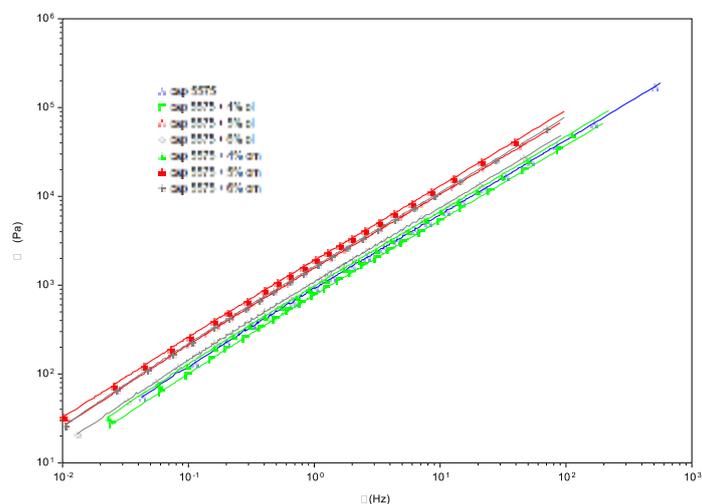


Figura 4.51: Curva mestra do CAP 55/75 com adições de Óleo de Mamona e de Linhaça.



#### 4.2.5 Fluência e Recuperação sobre Tensão Múltipla – MSCR

No presente item são delineados os resultados obtidos a partir do ensaio de fluência e recuperação (MSCR) para as amostras na situação após o envelhecimento a curto prazo com o auxílio do procedimento RTFO. Cada resultado obtido foi a partir da média de três amostras ensaiadas. Em destaque, a princípio, para algumas ponderações acerca desse ensaio, o MSCR se configura como o novo critério de resistência dos ligantes à deformação permanente.

O ensaio MSCR possui vantagens em comparação ao parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$ , sendo uma delas a possibilidade de avaliação da dependência dos ligantes asfálticos modificados com polímeros quanto à tensão, o que não é possível de ser feito em outros ensaios porque estes são executados na faixa de comportamento viscoelástico linear dos ligantes asfálticos. O conhecimento desta dependência é extremamente importante para a caracterização adequada dos ligantes asfálticos, especialmente

daqueles modificados com polímeros, uma vez que estes modificadores apresentam uma resposta mais complexa às tensões e deformações elevadas (D'ANGELO et. al., 2007; DOMINGOS, 2011). Além dessa, outra vantagem reside no valor de  $J_{nr}$ , o qual tem proporcionado correlações melhores com as deformações permanentes de pistas experimentais de campo ou de laboratório em relação ao parâmetro  $G^*/\sin\delta$ , como mostrado em estudos de muitos pesquisadores (D'ANGELO et. al. 2007; D'ANGELO, 2008; DREESSEN et. al., 2009; D'ANGELO, 2010, Asphalt Institute, 2010, DOMINGOS, 2011).

Esses resultados ocorreram porque o parâmetro atual de deformação permanente  $G^*/\sin\delta$  não representa, de maneira adequada, a habilidade de alguns ligantes asfálticos modificados com polímeros em resistir à deformação permanente. Esta deficiência é atribuída, dentre outros fatores, aos níveis baixos de tensão e de deformação aplicados durante o ensaio de regime oscilatório, fazendo com que a rede polimérica presente no ligante asfáltico nunca seja realmente ativada. Em virtude das condições do ensaio de regime oscilatório, o polímero é visualizado apenas como um filler que enrijece o ligante asfáltico (ANDERSON et. al., 2010; D'ANGELO, 2010a).

Segundo Pamplona (2013), embora este parâmetro represente adequadamente a resistência dos ligantes asfálticos não modificados à deformação permanente, pesquisas têm mostrado que o mesmo não ocorre com os ligantes asfálticos modificados e, assim, alternativas foram propostas em estudos como os de Bahia et. al., (2001), Bouldin et. al., (2001) e Shenoy (2001) a fim de caracterizar, de maneira mais adequada, a resistência dos ligantes asfálticos modificados à deformação permanente.

Sendo assim, a análise com o auxílio do ensaio de MSCR consistiu em obter:

- ✓ o percentual de recuperação (%R), que fornece uma indicação da resposta elástica retardada do ligante asfáltico;
- ✓ a compliância não-recuperável ( $J_{nr}$ ), que possibilita avaliar o potencial do ligante asfáltico quanto à deformação permanente e
- ✓ o parâmetro  $J_{nr,diff}$ , que permite avaliar a sensibilidade dos ligantes asfálticos à mudanças no nível de tensão.

Os ensaios de MSCR foram realizados para as temperaturas máximas do PG (ver Figura 4.21), uma vez que o Asphalt Institute (2010) recomenda que as análises sejam efetuadas na temperatura que o ligante estará submetido durante sua vida útil.

Na Tabela 4.12 estão apresentados os valores percentuais da recuperação (%R) para as amostras com os ligantes puros e com adições de OM e de OL. Ao analisar os resultados para o nível de tensão 100 Pa, a adição de 4% (43,5%) e 5% (43,9%) de OM proporcionaram um aumento na recuperação do CAP 50/70, tendo o percentual de 6% (17,6%) aquele com o menor valor de recuperação. Entretanto, para o nível de 3200 Pa os valores foram relativamente baixos e neste aspecto o resultado não é satisfatório,

pois segundo Sobreiro (2014) o percentual de recuperação identifica a resposta elástica do ligante, um valor nulo para esta propriedade indica que a deformação acumulada no material não sofre qualquer recuperação. A maior recuperação para o nível de 3200 Pa foi alcançada com 6% de OM.

Para as amostras com adições de OL, considerando o nível de 100 Pa, o percentual de 4% (38%) foi o de maior recuperação, seguido 5% (34,5%) e após por 6% (32,8%). Semelhantemente ao OM, no que se refere ao nível de tensão de 3200 Pa, as recuperações também foram baixas sendo a maior obtida com 6% de OL.

Para o CAP com polímero SBS o percentual de 6% de OM foi o de maior recuperação ambos os níveis de tensão, 52,6% para tensão de 100 Pa e 45,9% para tensão de 3200 Pa. Igualmente, o percentual de 6% de OL foi o que alcançou as maiores recuperações, 48,2% e 35,4% para 100 Pa e 3200 Pa, respectivamente.

Tabela 4.12: Percentuais de recuperação (R).

Amostras	Percentual de Recuperação (%)	
	100 Pa	3200 Pa
CAP 50/70	40,9	3,1
CAP 50/70 + 4% de Óleo de Mamona	43,5	2,9
CAP 50/70 + 5% de Óleo de Mamona	43,9	2,8
CAP 50/70 + 6% de Óleo de Mamona	17,6	3,3
CAP 50/70 + 4% de Óleo de Linhaça	38,0	1,3
CAP 50/70 + 5% de Óleo de Linhaça	34,5	2,2
CAP 50/70 + 6% de Óleo de Linhaça	32,8	2,9
CAP 55/75	38,0	33,0
CAP 55/75 + 4% de Óleo de Mamona	39,7	32,9
CAP 55/75 + 5% de Óleo de Mamona	39,1	37,4
CAP 55/75 + 6% de Óleo de Mamona	52,6	45,9
CAP 55/75 + 4% de Óleo de Linhaça	41,8	31,3
CAP 55/75 + 5% de Óleo de Linhaça	40,7	37,9
CAP 55/75 + 6% de Óleo de Linhaça	48,2	35,4

Na Figura 4.52 consta o gráfico das recuperações para as amostras de CAP50/70 e OM e OL, sendo fácil perceber uma tendência, para ambas as tensões, de aumento da recuperação com o acréscimo de OM até o percentual de 5% e diminuição com o acréscimo de OL. Para as amostras com CAP 55/75 e adições observa-se na Figura 4.53 um aumento da recuperação com o acréscimo de OM para os dois níveis de tensões. No caso das adições de Linhaça o aumento da recuperação ocorre com o acréscimo de OL apenas para o nível de tensão de 3200 Pa. Para o nível de tensão de 100 Pa a recuperação com o percentual de 4% é de 41,8%, cai para 31,3% e volta a aumentar para 6% de OL chegando em 48,2%.

Figura 4.52: Percentuais de recuperação (R) para amostra de CAP 50/70 com adições de Mamona e de Linhça.

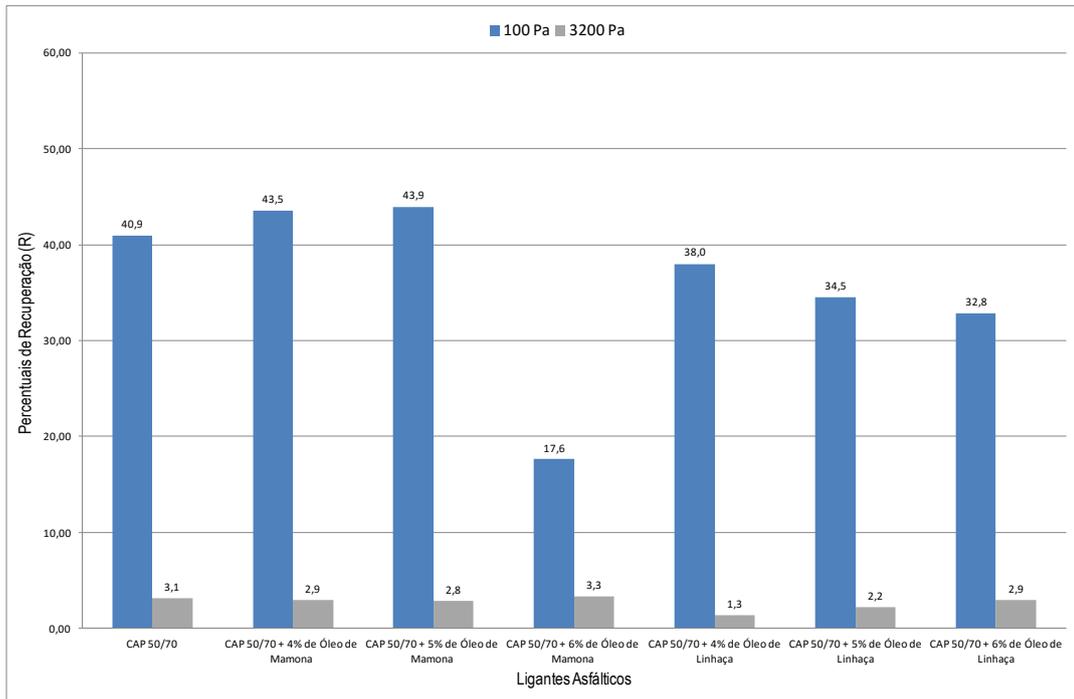
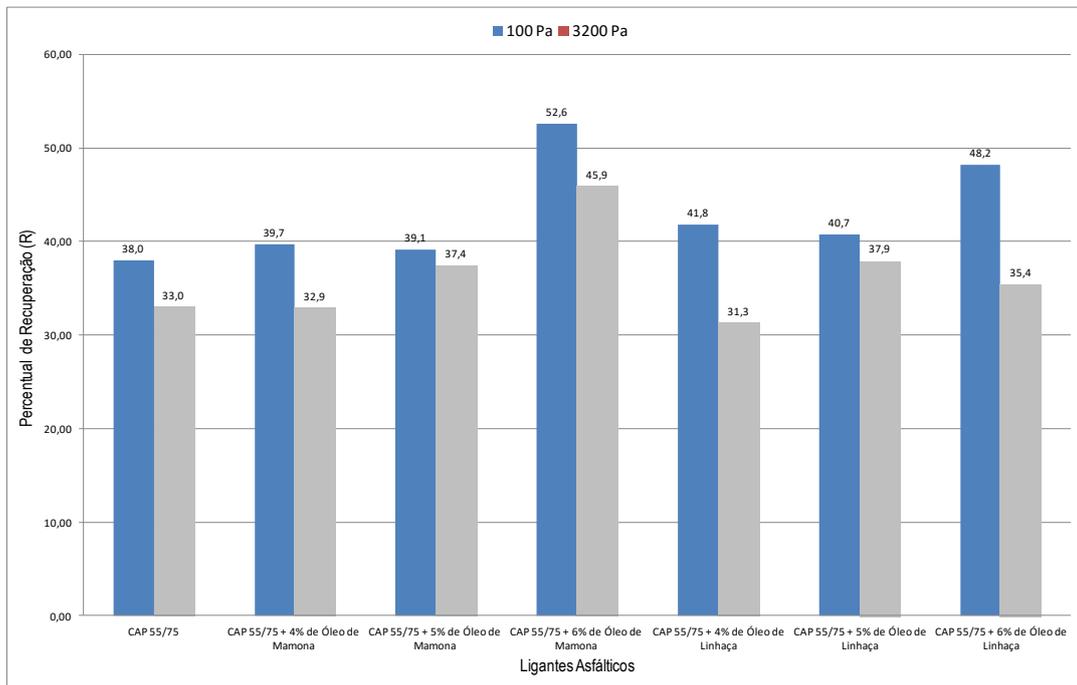


Figura 4.53: Percentuais de recuperação (R) para amostra de CAP 55/75 com adições de Mamona e de Linhça.



Na Tabela 4.13 constam os resultados de Compliâncias não-recuperáveis – Jnr que estão relacionados com a susceptibilidade do ligante à deformação permanente. Posto isso, quanto menor os valores de Jnr melhor, ou seja, menor é a susceptibilidade do ligante à deformação permanente.

A análise dos valores da Tabela 4.13 permite indicar a maior resistência à deformação permanente para o ligante CAP 50/70 + 5% de OM apresentando 1,30 kPa<sup>-1</sup> ao nível de 100 kPa e 2,33 kPa<sup>-1</sup> ao nível de 3200 Pa. Soma-se a isto, que para essa amostra o Jnr, dif foi de 79,4%, valor superior aos 75% preconizados pela norma AASHTO MP19, cujo limite tem por desígnio assegurar que o ligante asfáltico não seja excessivamente sensível à variação no nível de tensão (ANDERSON et. al., 2010; ASPHALT INSTITUTE, 2010).

O CAP 50/70 + 4% de OM também apresentou valor de Jnr,dif superior ao estabelecido em norma, neste caso 78,8%. Para as amostras com OL o melhor resultado foi para a amostra de CAP 50/70 + 6% que apresentou apresentando 1,77 kPa<sup>-1</sup> ao nível de 100 kPa e 2,61 kPa<sup>-1</sup> ao nível de 3200 Pa e Jnr, dif de 47,4%.

Para as amostras de CAP 55/75 com adições de OM e OL os melhores resultados foram obtidos para o percentual de 6% para ambos os óleos uma vez que apresentaram os menores valores de Jnr e maiores valores de jnr, dif.

Nas Figuras 4.54 e na Figura 4.55 constam ilustrados graficamente os resultados de Jnr para as amostras de CAP puro e modificado com adições de OM e de OL, respectivamente.

Tabela 4.13: Compliâncias não-recuperáveis (Jnr) e Jnr, dif.

AMOSTRA	Compliancia não-recuperável (Jnr) KPa <sup>-1</sup>		Jnr,dif (%)
	100 Pa	3200 Pa	
CAP 50/70	1,54	2,62	70,0
CAP 50/70 + 4% de Óleo de Mamona	2,47	4,42	78,8
CAP 50/70 + 5% de Óleo de Mamona	1,30	2,33	79,4
CAP 50/70 + 6% de Óleo de Mamona	3,05	3,33	9,2
CAP 50/70 + 4% de Óleo de Linhaça	4,35	5,24	20,6
CAP 50/70 + 5% de Óleo de Linhaça	1,80	2,75	52,9
CAP 50/70 + 6% de Óleo de Linhaça	1,77	2,61	47,4
CAP 55/75	1,76	1,89	7,2
CAP 55/75 + 4% de Óleo de Mamona	1,76	1,96	11,4
CAP 55/75 + 5% de Óleo de Mamona	1,24	1,26	1,5
CAP 55/75 + 6% de Óleo de Mamona	0,89	1,23	39,0
CAP 55/75 + 4% de Óleo de Linhaça	1,62	1,93	18,6
CAP 55/75 + 5% de Óleo de Linhaça	0,95	0,99	4,4
CAP 55/75 + 6% de Óleo de Linhaça	0,91	1,16	27,4

Figura 4.54: Compliâncias não-recuperáveis Jnr para amostras de CAP 50/70 com adições de OM e OL.

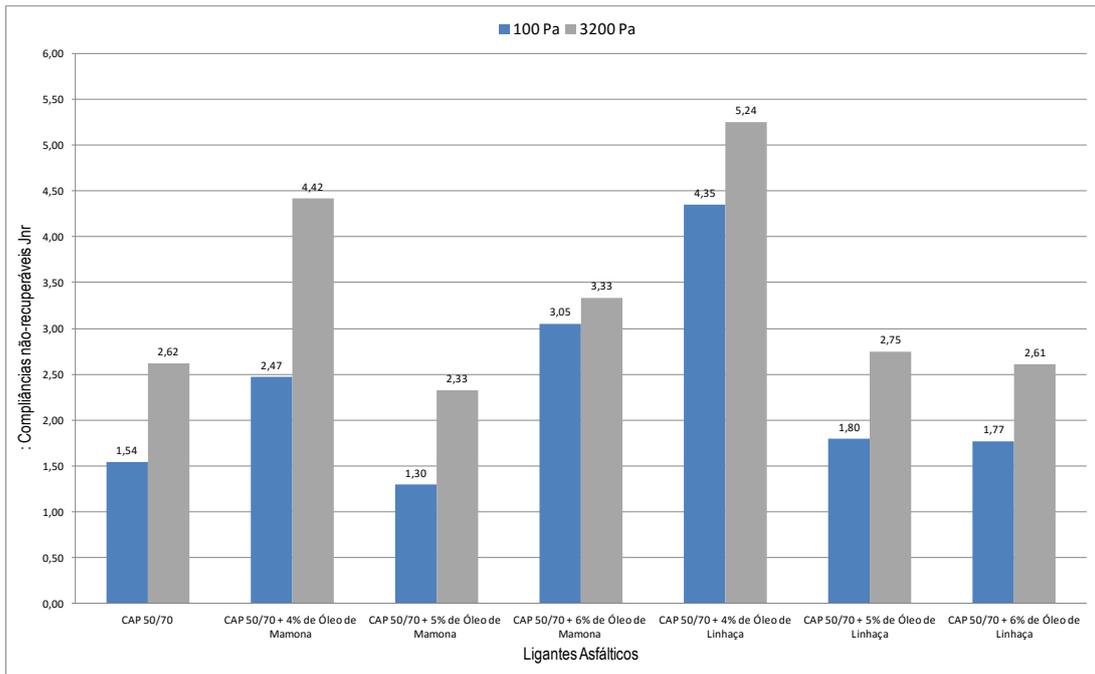
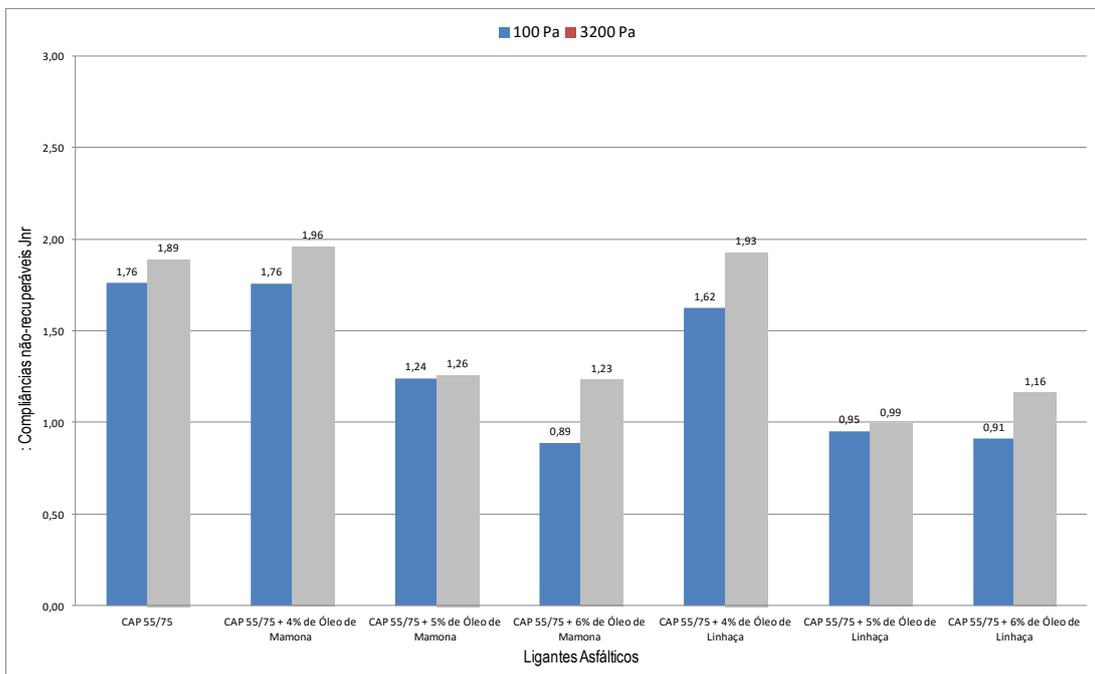


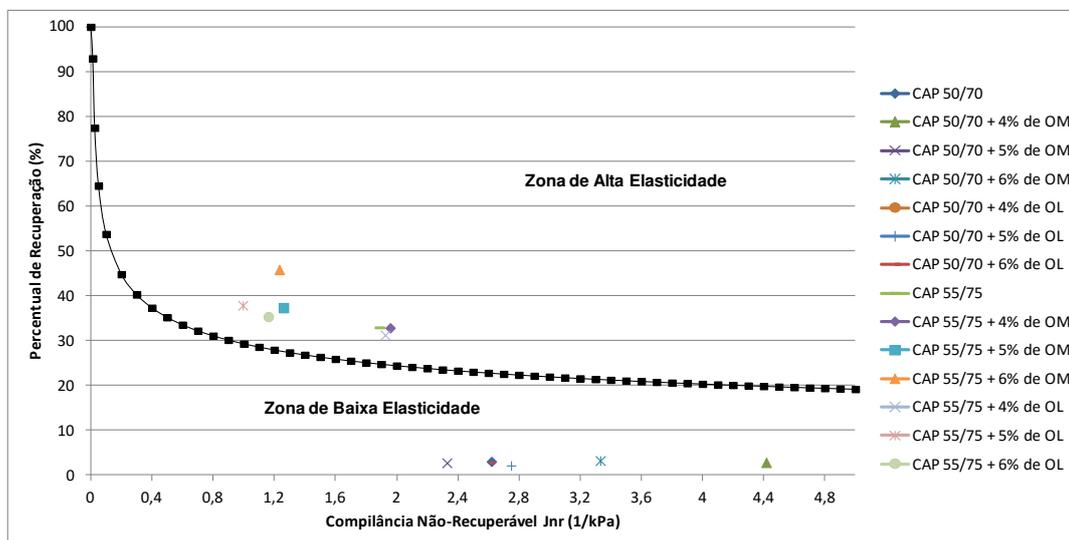
Figura 4.55: Compliâncias não-recuperáveis Jnr para amostras de CAP 55/75 com adições de OM e OL.



Os valores mínimos de percentual de recuperação podem, também, ser apresentados de forma gráfica, conforme Figura 4.56, sendo que os pares ordenados (Jnr; R) localizados acima da curva são designados de alta elasticidade e aqueles localizados abaixo da curva de baixa elasticidade.

Examinando os resultados constata-se, na Figura 4.56, que todas as amostras contendo o CAP 55/75 localizaram-se na Zona de Alta Elasticidade em função da elasticidade proporcionada pelo polímero SBS. Enquanto que, as amostras com o CAP 50/70 localizaram-se na Zona de Baixa Elasticidade.

Figura 4.56: Relação entre a compliância não-recuperável e o percentual de recuperação a 3200 Pa.



Com base no critério de tráfego do FHWA (D'ANGELO, 2010) foram classificadas todas as amostras, conforme consta na Tabela 4.14. Os níveis de carregamento suportado pelas amostras de ligantes foram determinados em função dos valores limites máximos de Jnr a 3200 Pa para as temperaturas do PG após o procedimento de envelhecimento a curto prazo com o auxílio do RTFO. Para as amostras com o CAP 55/75 a classificação do tráfego indicou de pesado a muito pesado (CAP 55/75 + 5% OL). Para o CAP 50/70 a classificação obtida foi de tráfego padrão a pesado.

Tabela 4.14: Classificação do nível de tráfego dos ligantes asfálticos quanto ao valor do Jnr.

Amostra	Temperatura (°C) PG após o RTFOT	Jnr a 3200 Pa (kPa <sup>-1</sup> )	Critério FHWA
CAP 50/70	64	2,62	Pesado (H)
CAP 50/70 + 4% de Óleo de Mamona	64	4,42	Padrão (S)
CAP 50/70 + 5% de Óleo de Mamona	58	2,33	Pesado (H)
CAP 50/70 + 6% de Óleo de Mamona	58	3,33	Padrão (S)
CAP 50/70 + 4% de Óleo de Linhaça	58	5,24	Padrão (S)
CAP 50/70 + 5% de Óleo de Linhaça	58	2,75	Pesado (H)
CAP 50/70 + 6% de Óleo de Linhaça	58	2,61	Pesado (H)
CAP 55/75	70	1,89	Pesado (H)
CAP 55/75 + 4% de Óleo de Mamona	64	1,96	Pesado (H)
CAP 55/75 + 5% de Óleo de Mamona	58	1,26	Pesado (H)
CAP 55/75 + 6% de Óleo de Mamona	58	1,23	Pesado (H)
CAP 55/75 + 4% de Óleo de Linhaça	64	1,93	Pesado (H)
CAP 55/75 + 5% de Óleo de Linhaça	58	0,99	Muito Pesado (E)
CAP 55/75 + 6% de Óleo de Linhaça	58	1,16	Pesado (H)

### 4.3 Espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A análise espectrométrica foi realizada objetivando a identificação dos principais grupos constituintes dos ligantes puros e modificados antes e após o RTFO. O percentual adicionado ao CAP puro e modificado de OM e de OL foi de 5%.

Nas Figuras 4.57 a 4.60 constam os espectros de infravermelho por transformada de Fourier - FTIR das amostras de CAP 50/70 com adição de OM e OL e do CAP 55/75 com adição de OM e OL, respectivamente contendo as principais bandas utilizadas para as análises dos espectros.

Bandas por volta de  $1700\text{ cm}^{-1}$  são associadas a C=O de carboxilas, cetonas, aldeídos, ésteres ou amidas. Bandas em volta de  $1600\text{ cm}^{-1}$  são associadas a C=C de grupos aromáticos e picos em torno de  $1460\text{ cm}^{-1}$  e  $1376\text{ cm}^{-1}$  são relacionados aos grupos alifáticos  $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$  (ARAÚJO, 2012).

Bandas em volta de  $1032\text{ cm}^{-1}$  associadas a S=O de grupos sulfóxidos e outras bandas em 748, 807 e  $860\text{ cm}^{-1}$  relacionadas à deformação C-H de grupos aromáticos.

Segundo Tia et. al. (1994) a razão da absorvância a  $1700\text{ cm}^{-1}$  correspondente ao grupo C=O e a  $1600\text{ cm}^{-1}$  correspondente ao grupamento C=C de aromáticos pode ser usada para expressar o nível de oxidação do ligante asfáltico. A razão que originalmente seria de 0,3 passa para 0,6 após o envelhecimento. A partir de FTIR pode-se também monitorar a evolução de bandas características de oxidação do ligante, como aquela em  $1700\text{ cm}^{-1}$ , referente ao grupamento carbonila ou ainda em  $1032\text{ cm}^{-1}$ , referente ao grupamento sulfóxido. Outras bandas também são de interesse, por exemplo, aquele em  $1600\text{ cm}^{-1}$ , que é referente aos compostos aromáticos e cuja evolução mostra o consumo destes, no caso de uma oxidação (ARAÚJO, 2012).

Segundo Herrington (1995) os compostos sulfóxidos estão presentes no ligante asfáltico desde sua origem, mas também são formados durante o seu envelhecimento. De início a concentração de sulfóxido aumenta durante o processo de envelhecimento e a partir de um determinado período esta concentração pode diminuir, apontando assim que os sulfóxidos foram consumidos. Na Tabela 4.15 constam sintetizadas as principais bandas características de ligantes asfálticos.

O espectro do óleo de mamona apresentou bandas características entre  $2921 - 2853\text{ cm}^{-1}$  deformação axial da deformação H-C (saturado),  $1735\text{ cm}^{-1}$  relativas à deformação axial da ligação C=O, em  $1487\text{ cm}^{-1}$  associada à deformação angular do grupo  $\text{CH}_2$ , em  $1187\text{ cm}^{-1}$  relacionada à deformação angular C-C e  $755\text{ cm}^{-1}$  que representa deformações no plano  $\text{CH}_2$ .

Para o óleo de Linhaça as bandas obtidas foram em  $1744\text{ cm}^{-1}$  referente o estiramento carbonila C=O, em  $1466\text{ cm}^{-1}$  relacionada à deformação no plano  $\text{CH}_2$ . As vibrações em  $1240\text{ cm}^{-1}$ ,  $1161\text{ cm}^{-1}$  e  $1101\text{ cm}^{-1}$

são diagnósticos para ligação éster no triacilglicerol, conforme relatam Fonseca & Yoshida (2009), e banda de deformação CH fora do plano em 722 cm<sup>-1</sup>.

Tabela 4.15 Bandas de infravermelho características de um ligante asfáltico (SILVA, 2005).

Banda (cm <sup>-1</sup> )	Grupamento	Tipo de vibração	Símbolo
2955	Alifáticos (metilas)	Elongação assimétrica	ν <sub>as</sub> CH <sub>3</sub> - aril e ν <sub>as</sub> CH <sub>3</sub> - X
2923	Alifáticos (metilas e metilenos)	Elongação assimétrica	ν <sub>as</sub> (CH <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> )
2870	Alifáticos (metilas)	Elongação assimétrica	ν <sub>s</sub> CH <sub>3</sub>
2850	Alifáticos (metilenos)	Elongação assimétrica	ν <sub>s</sub> CH <sub>2</sub>
1700	Carbonilas	Elongação	ν C = O
1600	Aromáticos	Elongação	ν C = C
1460	Alifáticos	Deformação no plano	δ (CH <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> )
1376	Alifáticos	Deformação no plano	δ (CH <sub>3</sub> )
1308	Sulfonas	Elongação	ν SO <sub>2</sub>
1166	Sulfonas	Elongação	ν SO <sub>2</sub>
1032	Sulfóxidos	Elongação	ν S = O
865	Aromáticos (1 H isolado)	Deformação fora do plano	γ C = CH à 1 H isolado
812	Aromáticos (2-3 H adjacentes)	Deformação fora do plano	γ C = CH à 2-3 H adjacentes
745	Aromáticos (3-4 H adjacentes)	Deformação fora do plano	γ C = CH à 3-4 H adjacentes
722	Longas cadeias alifáticas	Rotação	R (CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub>

Por conseguinte, a partir dos espectros de infravermelho apresentados nas Figuras de 4.57 a 4.60 podem-se destacar as principais bandas características do CAP, já amplamente discutidos na literatura (ARTHUR, 1999, RAKI et. al., 2000; LAMONTAGNE et. al., 2001, OUYANG et. al., 2006, SILVA, 2005, DURRIEU et. al., 2007, FERNANDES, 2007, LIMA et. al., 2008, PIZZORNO, 2010, ARAÚJO, 2012, MOREIRA, 2013).

Observam-se para todas as amostras apresentadas nas Figuras de 4.57 a 4.60, um duplete de absorção em 2921 cm<sup>-1</sup> e 2850 cm<sup>-1</sup> indicando vibrações de estiramentos axiais de grupos CH<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub> (alifático). Além disto, banda em 1700 cm<sup>-1</sup> indicando vibrações de estiramento do grupo C=O, banda em torno de 1600 cm<sup>-1</sup> de vibrações de estiramento C=C, vibrações de C-H em torno de 1376 cm e 1460 cm<sup>-1</sup> relacionados, respectivamente, à deformações assimétricas e simétricas de grupos metílicos. Ainda, pico em 1032 cm<sup>-1</sup>, correspondente ao grupo funcional sulfóxido e bandas por volta de 807, 748 e 865 cm<sup>-1</sup> associadas às deformações de C-H de grupos aromáticos.

Figura 4.57: Espectros FTIR das amostras de CAP 50/70 e com adição de óleo de Mamona antes e após o RTFO.

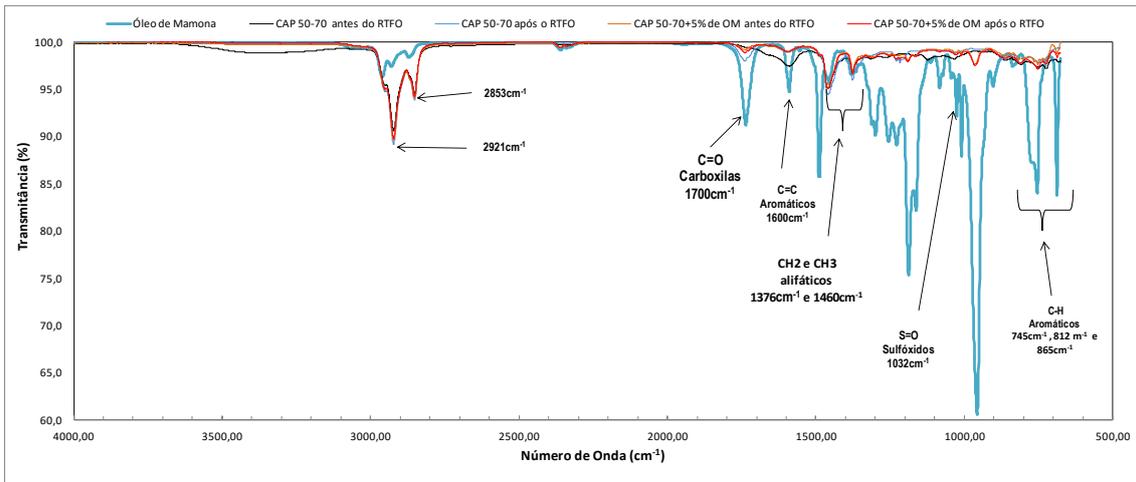


Figura 4.58: Espectros FTIR das amostras de CAP 50/70 e com adição de óleo de Linhaça antes e após o RTFO.

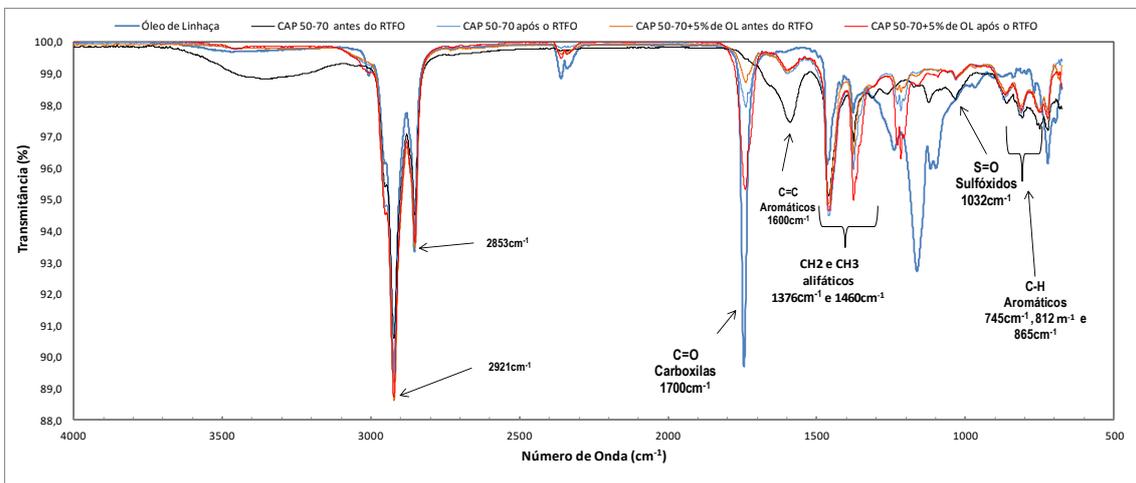


Figura 4.59: Espectros FTIR das amostras de CAP 55/75 e com adição de óleo de Mamona antes e após o RTFO.

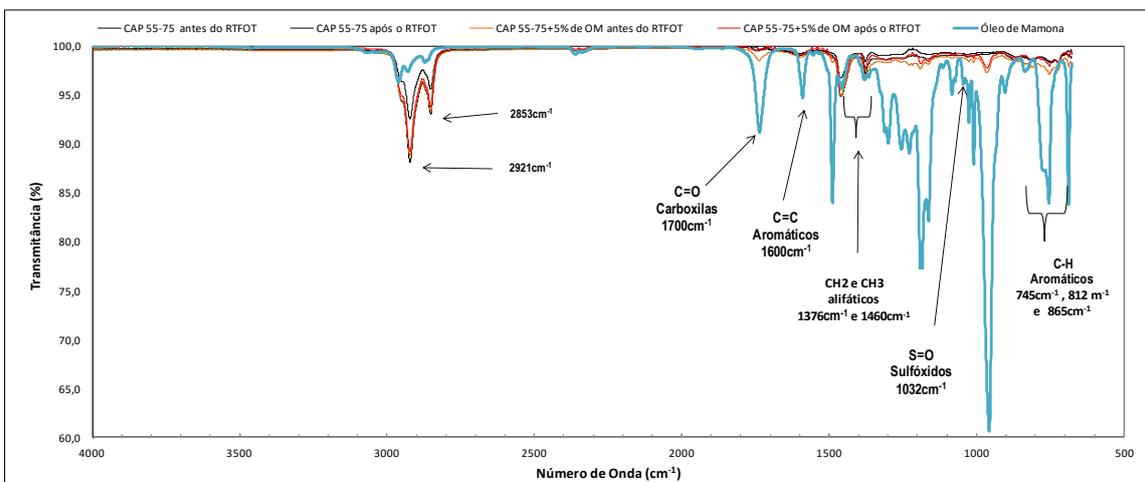
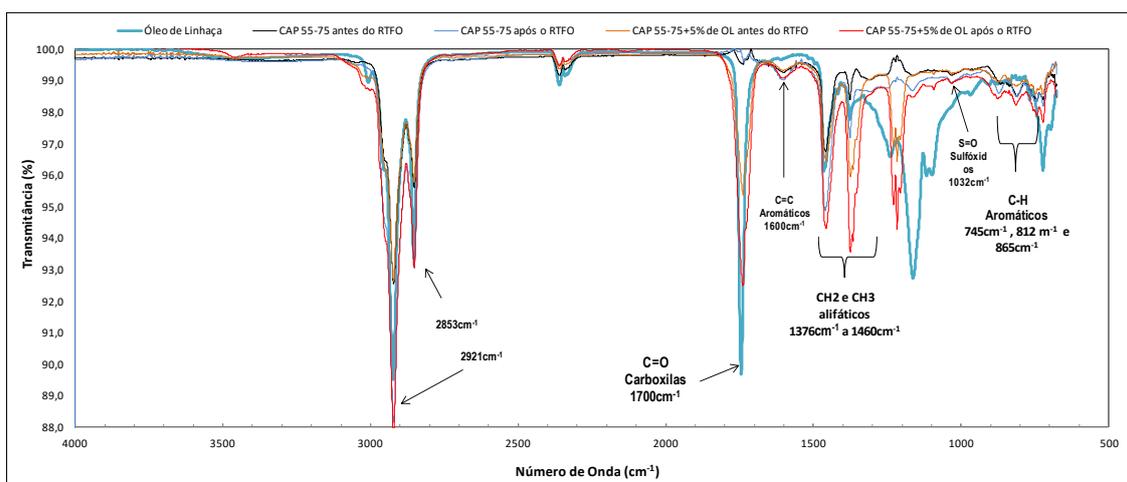


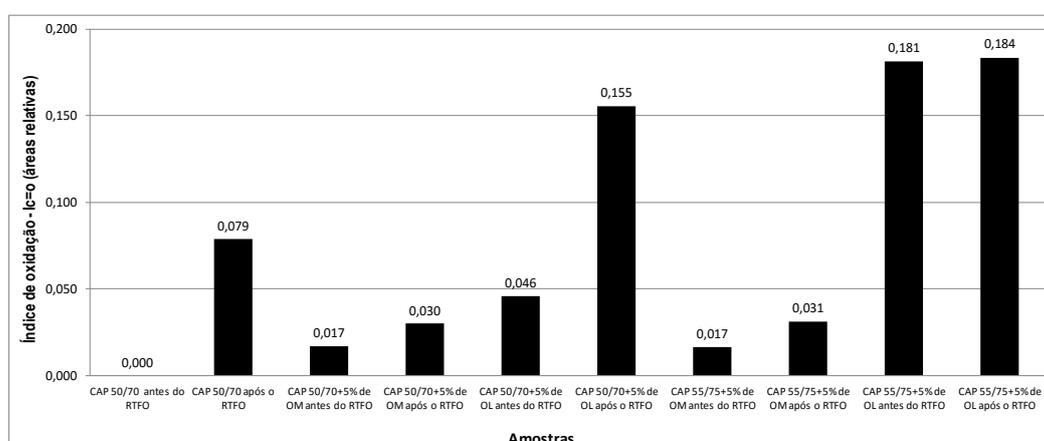
Figura 4.60: Espectros FTIR das amostras de CAP 55/75 e com adição de óleo de Linhaça antes e após o RTFO.



Para caracterização do efeito oxidativo causado pelo envelhecimento a curto prazo no RTFO foram calculadas as razões entre as áreas, conforme exposto no item 3.3.8, obtendo-se os índices estruturais mais comumente utilizados para análise de ligantes asfálticos, que são eles: índices de oxidação ( $I_{C=O}$ ), Aromáticos ( $I_{C=C}$ ), Alifáticos ( $I_{AF}$ ) e Sulfóxido ( $I_{S=O}$ ).

Observa-se na Figura 4.61 que as amostras contendo adição de OL apresentaram maiores índices de oxidação ( $I_{C=O}$ ) que, segundo Pizzorno (2010), uma simples explicação para o aumento destas absorções envolve a formação de ligações carbonooxigênio devido à oxidação fotoquímica de alguns hidrocarbonetos. O CAP 50/70 puro não apresentou absorção em  $1700\text{ cm}^{-1}$ , cujo pico é característico de carbonilas. Em contrapartida, após o RTFO o espectro do CAP 50/70 apresentou pico em  $1700\text{ cm}^{-1}$  indicando assim o envelhecimento do ligante. O Óleo de Mamona, para o CAP 50/70 e CAP 55/75, apresentou  $I_{C=O}$  menores que os obtidos com o óleo de Linhaça.

Figura 4.61: Índice de oxidação dos ligantes asfálticos.



O índice de aromáticos ( $I_{C=C}$ ), conforme Figura 4.62, diminuiu com o envelhecimento, ou seja, no processo oxidativo ocorre a diminuição do  $I_{C=C}$  e o consumo do  $I_{C=C}$ . Do mesmo modo, ocorreu o aumento

dos alifáticos com o auxílio de deformações nos planos das ligações de CH<sub>2</sub> e CH<sub>3</sub>, conforme Figura 4.63. Na Figura 4.64 observa-se que o índice de sulfóxidos I<sub>S=O</sub>, por sua vez, permaneceu praticamente inalterado para as amostras contendo OL, porém aumentou para a amostra de CAP 50/70 e CAP 50/70 + 5% após o RTFO.

Figura 4.62: Índice de aromáticos dos ligantes asfálticos.

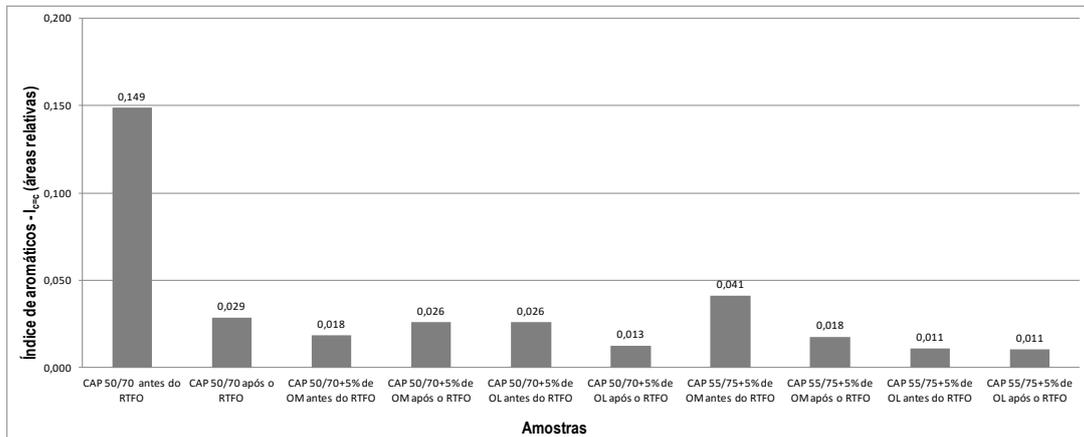


Figura 4.63: Índice de alifáticos dos ligantes asfálticos.

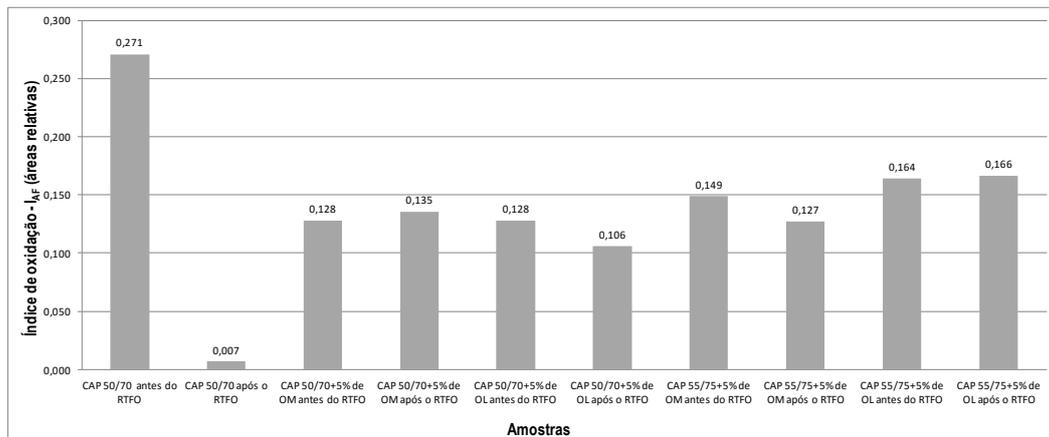
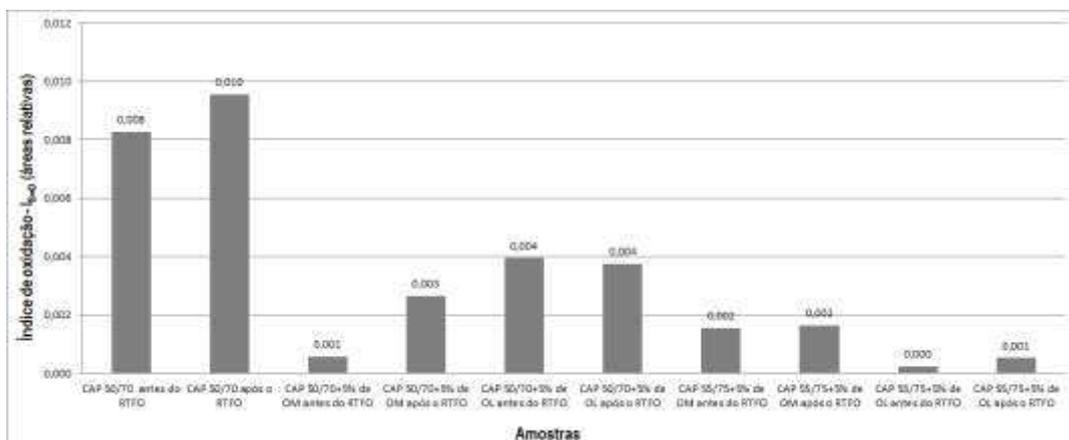


Figura 4.64: Índice de sulfóxidos dos ligantes asfálticos.



Consubstanciado nos resultados dos ensaios reológicos, no FTIR e nas propriedades mecânicas que estão contempladas no item 4.8 é possível inferir que, apesar do óleo de linhaça, como visto anteriormente, ter apresentado maior perda de massa, maior índice de envelhecimento – IE e maior índice de oxidação, possivelmente, está propiciando a proteção dos CAPS. Conjectura-se que essa proteção ocorra com o auxílio de uma película protetora, a julgar por comparar aos resultados com os do OM, a amostra com adição de OL apresentou maior penetração, menor viscosidade rotacional e maior recuperação elástica após o procedimento de envelhecimento a curto prazo.

Posto isso, para asseverar esses benefícios considerando que o óleo de Linhaça estaria de fato agindo como uma película protetora do ligante e, neste sentido, se “sacrificando” para proteger os ligantes CAP 50/70 e 55/75 o ensaio SARA seria o mais indicado para comprovar estas propriedades, pois permitiria quantificar os principais constituintes CAP e, com isso, realmente constatar se as amostras contendo o OL mantiveram, após o envelhecimento com o auxílio do RTFO, os maiores percentuais relativos à parte dos maltenos.

#### 4.4 Propriedades Físicas dos Materiais Granulares

Neste item serão abordadas as propriedades físicas e mecânicas dos materiais individualizados, ou seja, dos materiais que irão compor as misturas asfálticas.

##### 4.4.1 Ensaio de Equivalente de Areia

O ensaio de equivalente de areia resultou em 88,46% para a areia e 77,39% para o pó de pedra. Para a utilização da areia e do pó de pedra em misturas asfálticas o equivalente de areia deve ser de no mínimo de 55%, conforme preconizado na norma DNIT ME 054/97.

##### 4.4.2 Peso Específico Real e Aparente

Na Tabela 4.16 constam 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.

Tabela 4.16: Peso específico real dos agregados graúdos e miúdos utilizados nas misturas asfálticas.

D (mm)	Massa Específica Real (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )
25,4	2,6708	2,6618
19,1	2,6683	2,661
12,5	2,6661	2,6491
Areia	2,4667	2,4272
Pó de pedra	2,4891	2,4733

Estes resultados serão 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.

#### 4.4.3 Absorção dos agregados

Os resultados do ensaio de absorção dos agregados graúdos e miúdos estão inseridos na Tabela 4.17. Segundo a norma DNIT ME 081/98 os agregados com absorção menor que 2%, os resultados de duas determinações consecutivas, com amostra do mesmo agregado, não devem diferir em mais de 0,25%. Essa restrição foi considerada na determinação do ensaio de forma a atender ao critério normativo.

Tabela 4.17: Resultados do ensaio de absorção (ME 086/94).

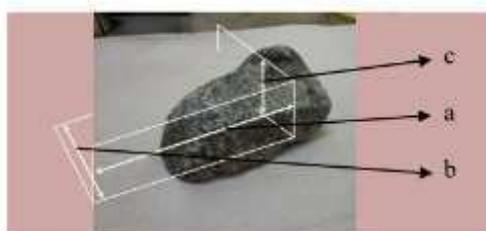
D (mm)	Resultado (%)
25,4	0,336
19,1	0,276
12,5	0,637
Areia	0,11
Pó de pedra	0,77

#### 4.4.4 Índice de Forma

Um fator preponderante para um bom desempenho de um agregado britado é a forma do grão. A forma mais indicada para a partícula de agregado é a forma cúbica, logo, partículas alongadas, lamelares, ou mesmo alongadas-lamelares apresentam formas incompatíveis para um bom travamento do esqueleto mineral.

As normas para determinação da forma das partículas fazem, normalmente, relação das três dimensões mais evidentes (Figura 4.65). Deve-se supor o agregado envolvido por um paralelogramo, sendo a maior dimensão o comprimento denominado pela letra “a”, “b” a dimensão intermediária também identificada como largura e a letra “c” que indica a espessura, essa a de menor dimensão (MOURA 2015).

Figura 4.65: Dimensões consideradas para a determinação da forma de agregados (MOURA, 2015).



A forma das partículas dos agregados influi na trabalhabilidade, na resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas e muda a energia de compactação necessária para se alcançar certa densidade (CARTERET et. al., 2014). Partículas irregulares ou de forma angular, tais como, pedra britada, cascalho e algumas areias de brita tendem a apresentar melhor intertravamento entre os grãos compactados, tanto maior quanto mais cúbicas forem as partículas e mais afiadas forem suas arestas.

A forma das partículas é caracterizada pela determinação do índice de forma (f) em ensaio descrito no método DNIT-ME 086/94. Esse índice varia de 0,0 a 1,0, sendo o agregado considerado de ótima cubicidade quando  $f=1,0$  e lamelar quando  $f=0,0$ . É adotado o limite mínimo de  $f=0,5$  para aceitação de agregados quando a forma. Os resultados do ensaio de formas de partículas dos agregados graúdos estão inseridos na Tabela 4.18. (ME 086/94 do DNIT).

Tabela 4.18: Resultados do Índice de forma (ME 086/94).

D (mm)	Resultado (%)
25,4	0,914
19,1	0,926
12,5	0,775

#### 4.4.5 Abrasão “Los Angeles”

Os valores obtidos para os desgastes por Abrasão “Los Angeles” foram 27,5%, 26,3% e 23,0%, respectivamente, para os agregados de Diâmetro Nominal Máximo de 25,4, 19,4 e 12,5 mm. Estes valores estão em consonância com o máximo recomendado pela norma brasileira (ME 035/98 do DNIT) para os serviços de pavimentação, cujo valor deve ser menor que 50% e, portanto, compatível para a utilização em misturas asfálticas.

### 4.5 Dosagem pelo Método Marshall

#### 4.5.1 Enquadramento Granulométrico

Na Tabela 4.19 e na Figura 4.69 estão apresentados os resultados da distribuição granulométrica dos agregados. A partir destes foram estabelecidas as proporções dos agregados graúdos e miúdos, de acordo com as especificações da Faixa granulométricas “B” preconizadas pelo DNIT, para a obtenção do teor ótimo de asfalto pelo procedimento Marshall, exposto na Tabela 4.20 e demonstrada pela curva das Figuras 4.67 e 4.68.

Tabela 4.19: Distribuição granulométrica dos agregados.

Peneira	Brita 25,4	Brita 19,1	Brita 12,7	Pó de Pedra	Areia	Cal
1 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	73,58	82,26	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	1,62	11,36	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	0,11	4,03	92,39	100,00	100,00	100,00
N° 4	0,04	3,09	40,71	99,86	99,78	100,00
N° 10	0,04	2,80	13,69	81,47	97,62	100,00
N° 40	0,03	2,03	5,44	32,89	59,08	100,00
N° 80	0,02	1,27	2,96	15,10	23,10	99,90
N° 200	0,01	0,65	1,44	6,64	7,02	84,48

Figura 4.66: Curva granulométrica dos agregados.

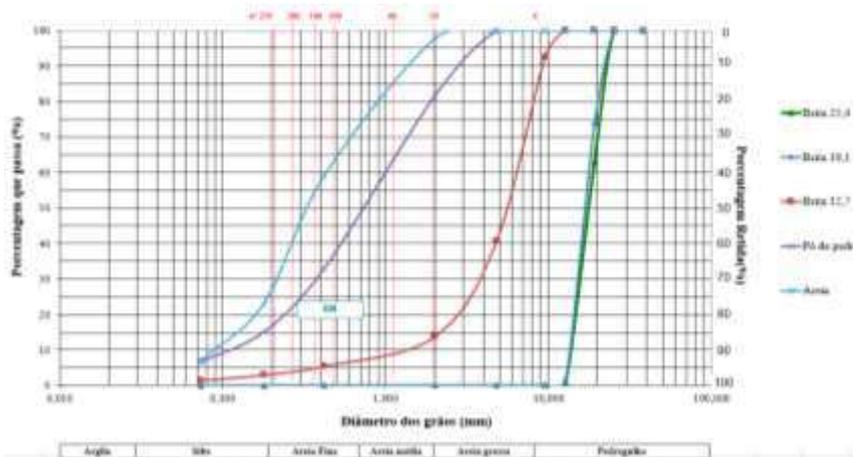


Tabela 4.20: Composição dos agregados estabelecida com a aproximação do Limite Intermediário [Faixa B do DNIT].

PENEIRAS	PORCENTAGEM PASSANDO - MISTURA DE PROJETO INTERMEDIÁRIA 2M												ESPECIFICAÇÃO		
	BRITA 25		BRITA 19		BRITA 12,5		AREIA		PÓ DE PEDRA		FILLER				PROJETO
	TOTAL	14%	TOTAL	18%	TOTAL	30%	TOTAL	9%	TOTAL	25,0%	TOTAL	4%	Faixa B		
1 1/2"	100,00	14,00	100,00	18,00	100,00	30,00	100,00	9,00	100,00	25,00	100,00	4,00	100,00	100	100
1"	100,00	14,00	100,00	18,00	100,00	30,00	100,00	9,00	100,00	25,00	100,00	4,00	100,00	95	100
3/4"	73,58	10,30	82,26	14,81	100,00	30,00	100,00	9,00	100,00	25,00	100,00	4,00	83,11	80	100
1/2"	1,62	0,23	11,36	2,04	100,00	30,00	100,00	9,00	100,00	25,00	100,00	4,00	78,27		
3/8"	0,11	0,02	4,03	0,73	92,39	27,72	100,00	9,00	100,00	25,00	100,00	4,00	66,46	45	80
N° 4	0,04	0,01	3,09	0,56	40,71	12,21	99,78	8,98	99,86	24,97	100,00	4,00	58,72	28	60
N° 10	0,04	0,01	2,80	0,50	13,69	4,11	97,62	8,79	81,47	20,37	100,00	4,00	37,77	20	45
N° 40	0,03	0,00	2,03	0,37	5,44	1,63	89,08	5,32	32,89	8,22	100,00	4,00	19,54	10	32
N° 80	0,02	0,00	1,27	0,23	2,96	0,89	23,10	2,08	15,10	3,78	99,90	4,00	16,97	8	20
N° 200	0,01	0,00	0,65	0,12	1,44	0,43	7,02	0,63	6,64	1,66	84,48	3,38	6,22	5	8

Figura 4.67: Curva de projeto Teórica [Limite Intermediário da Faixa B do DNIT].

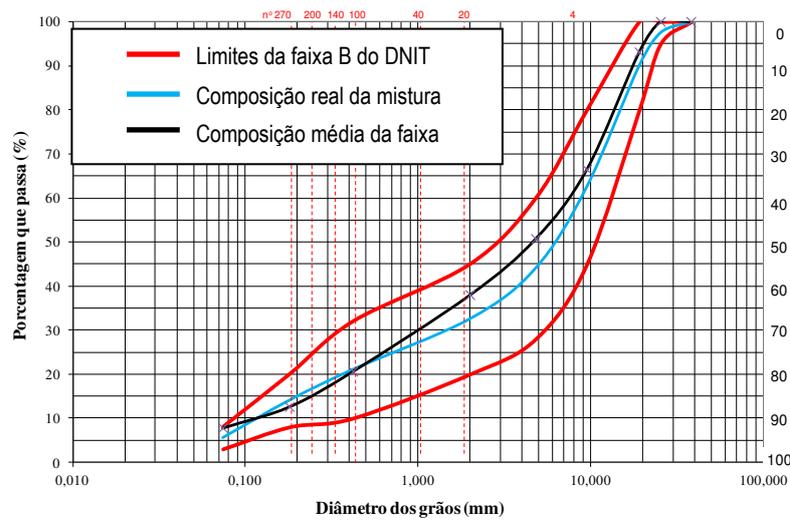
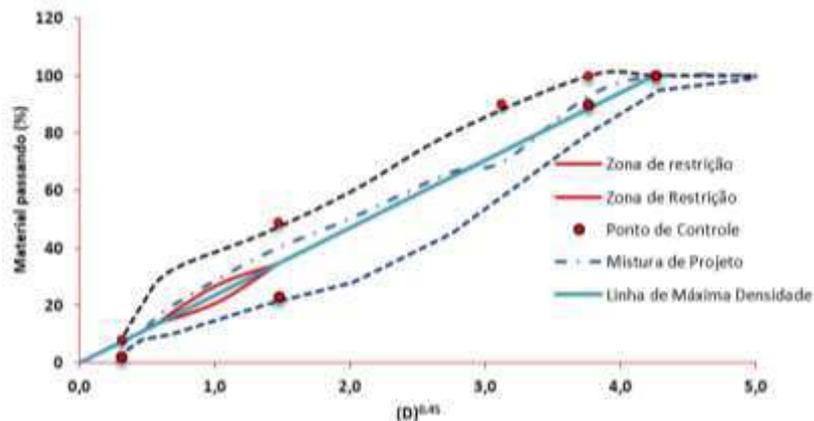


Figura 4.68: Curva de Fuller da composição dos agregados [Limite Intermediário da Faixa B do DNIT].



#### 4.5.2 Obtenção do Teor Ótimo de CAP 50/70

Após o enquadramento granulométrico foi iniciada a dosagem da mistura asfáltica. A norma brasileira não especificar o teor inicial, porém a literatura recomenda teores entre 3% e 6% da massa total do corpo de prova, sendo assim, foi escolhido como teor inicial o valor de 4,5%. O método Marshall determina que para a determinação do teor ótimo deverão ser confeccionados 3 corpos de prova para 5 teores distintos, esses teores adicionais vão variar em +0,5%, +1,0%, -0,5% e -1,0% do teor inicial determinado.

Com o teor inicial determinado e com a composição granulométrica estabelecida foi iniciada a fase de separação de corpos de prova. As composições foram ajustadas aos teores determinados e são demonstradas nas Tabelas de 4.21 a 4.25.

Tabela 4.21: Composição granulométrica para o teor de 3,5% de ligante asfáltico.

Brita 25,4	Brita 19,1	Brita 12,7	Pó de Pedra	Areia	Cal	CAP
13,51%	17,37%	28,95%	8,69%	24,13%	3,86%	3,50%
162,12	208,44	347,40	104,22	289,50	46,32	42,00

Tabela 4.22: Composição granulométrica para o teor de 4,0% de ligante asfáltico.

Brita 25,4	Brita 19,1	Brita 12,7	Pó de Pedra	Areia	Cal	CAP
13,44%	17,28%	28,80%	8,64%	24,00%	3,84%	4,00%
161,28	207,36	345,60	103,68	288,00	46,08	48,00

Tabela 4.23: Composição granulométrica para o teor de 4,5% de ligante asfáltico.

Brita 25,4	Brita 19,1	Brita 12,7	Pó de Pedra	Areia	Cal	CAP
13,37%	17,19%	28,65%	8,60%	23,88%	3,82%	4,50%
160,44	206,28	343,80	103,14	286,50	45,84	54,00

Tabela 4.24: Composição granulométrica para o teor de 5,0% de ligante asfáltico.

Brita 25,4	Brita 19,1	Brita 12,7	Pó de Pedra	Areia	Cal	CAP
13,30%	17,10%	28,50%	8,55%	23,75%	3,80%	5,00%
159,60	205,20	342,00	102,60	285,00	45,60	60,00

Tabela 4.25: Composição granulométrica para o teor de 5,5% de ligante asfáltico.

Brita 25,4	Brita 19,1	Brita 12,7	Pó de Pedra	Areia	Cal	CAP
13,23%	17,01%	28,35%	8,51%	23,63%	3,78%	5,50%
158,76	204,12	340,20	102,06	283,50	45,36	66,00

Com a TU (157,5°C) e a TC (145,5°C) determinadas para o CAP puro e os agregados separados foram iniciadas as compactações, sendo aplicados 75 golpes por face do corpo de prova, correspondente à uma via de tráfego pesado. Os corpos de prova após mistura sofreram envelhecimento, que consiste na aplicação da TC durante um intervalo de tempo de 2 horas, com o intuito de simular o envelhecimento que a mistura sofre em campo. Após o envelhecimento, os corpos de prova foram compactados em uma prensa automática e desmoldados no dia seguinte, onde foram determinados os seus diâmetros, espessuras, massa seca e massa submersa em água.

Com as densidades dos agregados e do ligante asfáltico foi determinada a DMT para cada teor utilizando o RICE Test, conforme exposto na Tabela 4.26. Em sequência, foram calculados os parâmetros volumétricos (Gmb, Vv, VAM e RBV), exibidos nas Tabelas de 4.27 a 4.30, respectivamente. Foi realizado ensaio de estabilidade Marshall em todos os corpos de prova e disposto na Tabela 4.31.

Tabela 4.26: Valores da densidade máxima teórica das composições de misturas asfálticas.

	Teor 3,5%	Teor 4,0%	Teor 4,5%	Teor 5,0%	Teor 5,5%
DMT	2,4477	2,4297	2,4116	2,3941	2,3765

Tabela 4.27: Valores da massa específica aparente das composições de misturas asfálticas.

	Teor 3,5%	Teor 4,0%	Teor 4,5%	Teor 5,0%	Teor 5,5%
Gmb (g/cm <sup>3</sup> )	2,2583	2,2732	2,3160	2,3298	2,3164

Tabela 4.28: Valores de volumes de vazios das composições das misturas asfálticas.

	Teor 3,5%	Teor 4,0%	Teor 4,5%	Teor 5,0%	Teor 5,5%
Vv (%)	7,74	6,44	3,96	2,69	2,53

Tabela 4.29: Valores dos vazios do agregado mineral das composições das misturas asfálticas.

	Teor 3,5%	Teor 4,0%	Teor 4,5%	Teor 5,0%	Teor 5,5%
VAM (%)	15,63	15,52	14,37	14,32	15,25

Tabela 4.30: Valores da relação betume/vazios das composições das misturas asfálticas.

	Teor 3,5%	Teor 4,0%	Teor 4,5%	Teor 5,0%	Teor 5,5%
RBV (%)	50,48	58,51	72,44	81,22	83,41

Tabela 4.31: Valores da estabilidade Marshall das composições das misturas asfálticas.

	Teor 3,5%	Teor 4,0%	Teor 4,5%	Teor 5,0%	Teor 5,5%
Estabilidade (Kgf)	818,84	973,40	1052,32	1002,99	772,80

Com todos os parâmetros obtidos foi possível a confecção dos gráficos que relacionam cada parâmetro ao teor de ligante da mistura asfáltica. A partir daí obtêm-se, então, as Figuras de 4.69 a 4.73, as quais irão auxiliar visualmente a escolha do teor ótimo de ligante.

Figura 4.69: Gráfico da densidade máxima teóricas das composições das misturas asfálticas.

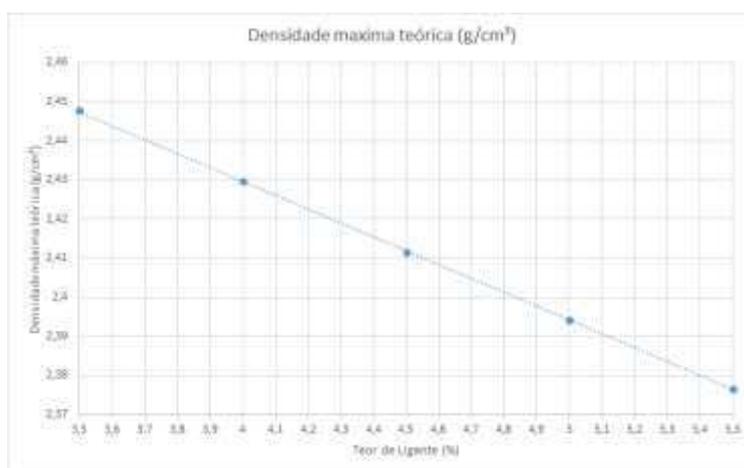


Figura 4.70: Gráfico da massa específica aparente das composições das misturas asfálticas.

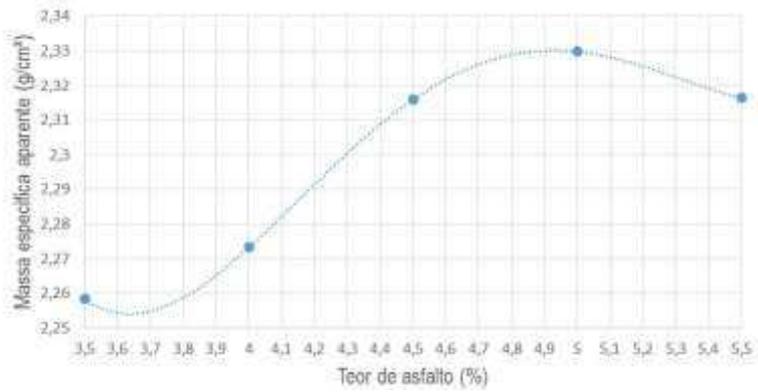


Figura 4.71: Gráfico do volume de vazios das composições de misturas asfálticas.

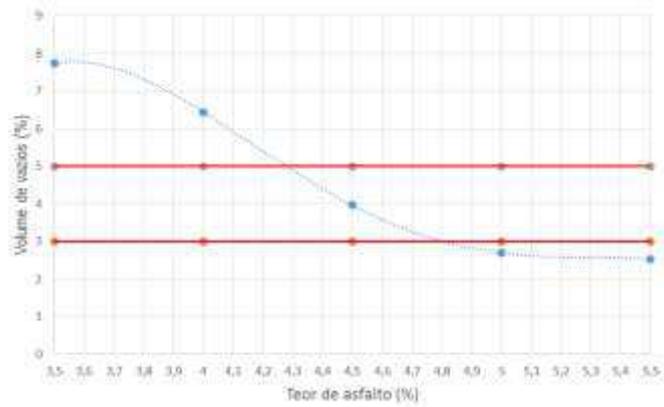


Figura 4.72: Gráfico dos vazios do agregado mineral das composições das misturas asfálticas.

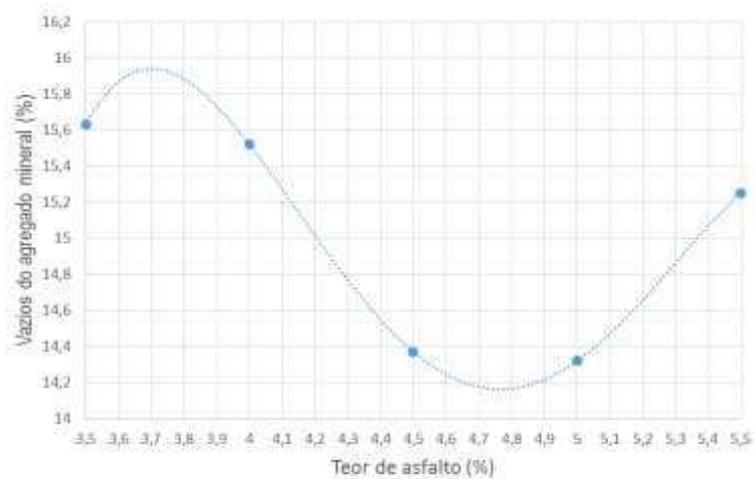


Figura 4.73: Gráfico da relação betume/vazios das composições das misturas asfálticas.

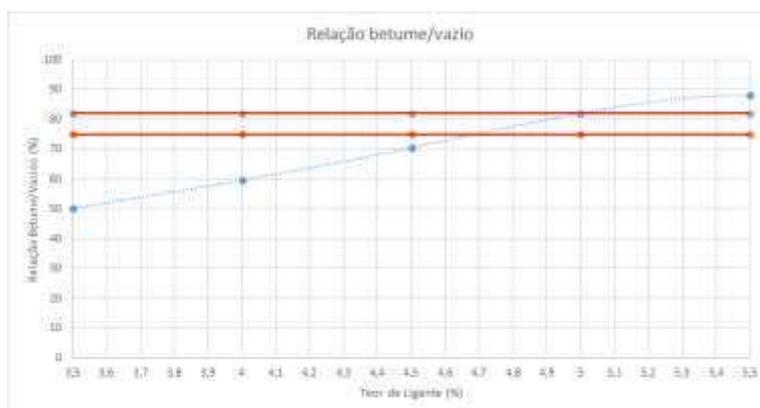
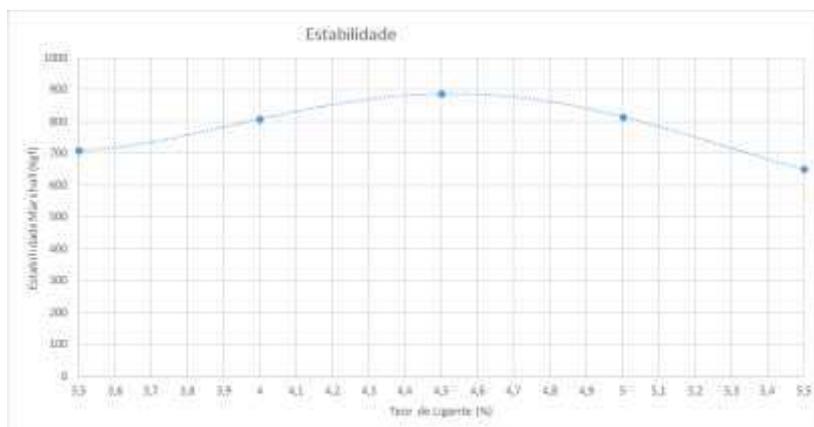


Figura 4.74: Gráfico da estabilidade Marshall das composições das misturas asfálticas.



Com a avaliação dos dados e gráficos é possível determinar o teor ótimo do ligante asfáltico. A norma DNIT 031/2006 - ES determina que, para as misturas asfálticas da faixa “B”, o volume de vazios deve estar contido dentro da faixa de 3 – 5 % e a relação betume/vazios dentro da faixa de 75 – 82 %. Assim, com a ajuda do gráfico, foram sinalizados os limites para esses parâmetros e aferidos os possíveis teores de ligante que poderiam constituir uma mistura asfáltica dentro desses parâmetros. É possível observar que o teor de 4,6% corresponde às expectativas de volumes de vazios, mas fica no limite da zona de restrição para a relação betume/vazios. Tendo esse fato em vista foi determinado que o teor ótimo de ligante asfáltico para essa composição analisada foi de 4,7%. Este teor compreende o Vv e o RBV preconizado em norma. Mesmo que a estabilidade seja inferior à do teor de 4,6%, esta se encontra dentro do estabelecido pela norma DNIT ME 043, que determina que a estabilidade mínima deva ser de 500 kgf.

Com o teor ótimo de ligante foi realizada uma nova compactação, seguindo os mesmos critérios com o teor de ligante de 4,7% para confirmação da avaliação. A Tabela 4.32 mostra a composição

granulométrica com o teor ótimo de ligante. As Figuras 4.75, 4.76 e a 4.77 demonstram graficamente os resultados.

Tabela 4.32: Composição granulométrica para o teor de 4,7% de ligante asfáltico.

Brita 25,4	Brita 19,1	Brita 12,7	Pó de Pedra	Areia	Cal	CAP
13,34%	17,15%	28,59%	8,58%	23,83%	3,81%	4,70%
160,10	205,85	343,08	102,92	285,90	45,74	56,40

A compactação resultou nos resultados exposto na Tabela 4.33.

Tabela 4.33: Valores obtidos para a composição de 4,7%.

	DMT (g/cm³)	Gmb (g/cm³)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidade Marshall (Kgf)
Mistura asfáltica com o teor de 4,7%	2,4167	2,3371	3,29	14,03	76,52	1039,44

Figura 4.75: Gráfico do volume de vazios das composições de misturas asfálticas.

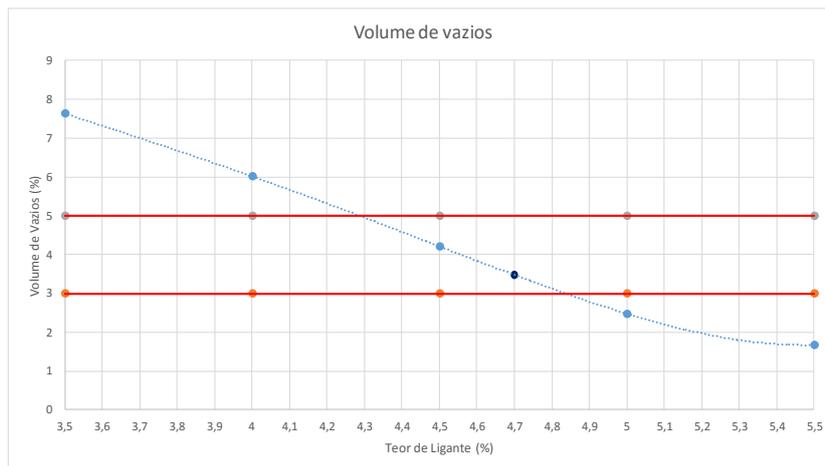


Figura 4.76: Gráfico da relação betume/vazios das composições das misturas asfálticas.

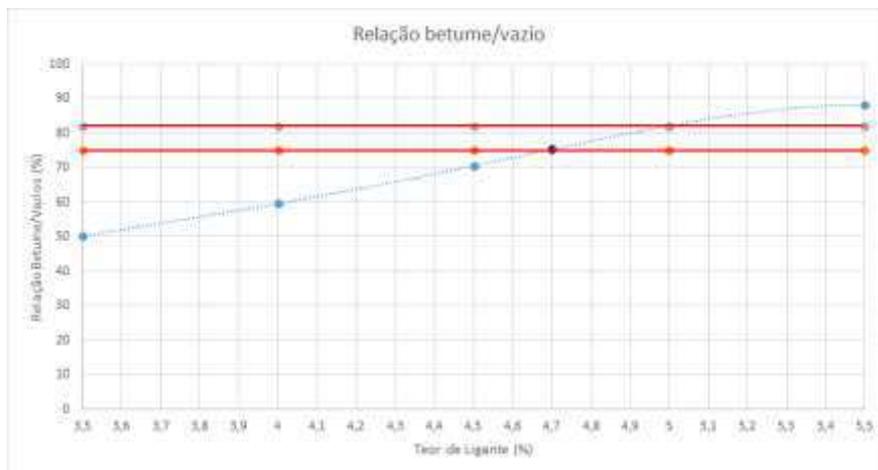
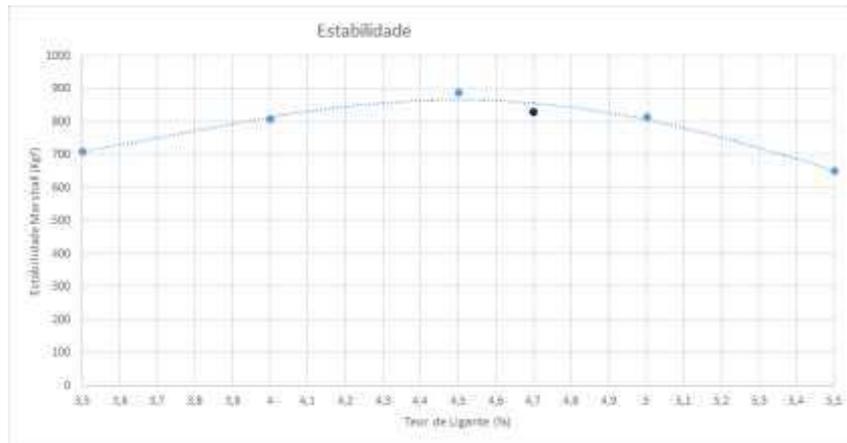


Figura 4.77: Gráfico da estabilidade Marshall das composições das misturas asfálticas.



Assim, ao avaliar os resultados obtidos, foram confirmadas as expectativas para o teor de 4,7% de ligante asfáltico. Podendo ser determinado que o valor de 4,7% de ligante asfáltico, corresponde ao teor ótimo de mistura para a composição avaliada.

#### 4.5.3 Obtenção do Teor Ótimo de CAP 55/75

Do mesmo modo, para o CAP 55/75 após o enquadramento granulométrico iniciou-se a dosagem da mistura asfáltica. Foi adotado como teor inicial o valor de 4,5%. O método Marshall determina que para a determinação do teor ótimo devam ser confeccionados 3 corpos de prova para 5 teores distintos, esses teores adicionais vão variar em +0,5%, +1,0%, -0,5% e -1,0% do teor inicial determinado.

Com o teor inicial determinado e com a composição granulométrica estabelecida foi iniciada a fase de separação de corpos de prova. As composições foram ajustadas aos teores determinados, igualmente, ao apresentado nas Tabelas 4.21 a 4.25 mudando o ligante asfáltico para o CAP 55/75.

Com as TU e TC determinadas e os agregados separados foram iniciadas as compactações. Determinou-se que seriam aplicados 75 golpes por face do corpo de prova, correspondentes a uma via de tráfego pesado e, como estabelecido anteriormente, TU de 175,0°C e TC de 162,5°C.

Os corpos de prova após mistura sofreram envelhecimento, que consiste na aplicação da TC durante um intervalo de tempo de 2 horas, com o intuito de simular o envelhecimento que a mistura sofre em campo. Após o envelhecimento os corpos de prova foram compactados em uma prensa automática e desmoldados no dia seguinte, no qual foram aferidos os seus diâmetros, espessuras, massa seca e massa submersa em água.

Com as densidades dos agregados e do ligante asfáltico foi determinada a DMT para cada teor utilizando o RICE Test, exposta na Tabela 4.34. Na sequência foram calculados os parâmetros volumétricos (Gmb,

Vv, VAM, RBV), expostos nas Tabelas de 4.35 a 4.38, respectivamente. Foi realizado o ensaio de estabilidade Marshall em todos os corpos de prova e disposto na Tabela 4.39.

Tabela 4.34: Valores da densidade máxima teórica das composições de misturas asfálticas.

	Teor 3,5%	Teor 4,0%	Teor 4,5%	Teor 5,0%	Teor 5,5%
DMT (g/cm <sup>3</sup> )	2,4267	2,4158	2,4021	2,3842	2,3563

Tabela 4.35: Valores da massa específica aparente das composições de misturas asfálticas.

	Teor 3,5%	Teor 4,0%	Teor 4,5%	Teor 5,0%	Teor 5,5%
Gmb (g/cm <sup>3</sup> )	2,2681	2,2829	2,3365	2,3389	2,3467

Tabela 4.36: Valores de volumes de vazios das composições das misturas asfálticas.

	Teor 3,5%	Teor 4,0%	Teor 4,5%	Teor 5,0%	Teor 5,5%
Vv (%)	7,71	6,42	3,93	2,65	2,54

Tabela 4.37: Valores dos vazios do agregado mineral das composições das misturas asfálticas.

	Teor 3,5%	Teor 4,0%	Teor 4,5%	Teor 5,0%	Teor 5,5%
VAM (%)	15,73	15,62	14,47	14,33	15,27

Tabela 4.38: Valores da relação betume/vazios das composições das misturas asfálticas.

	Teor 3,5%	Teor 4,0%	Teor 4,5%	Teor 5,0%	Teor 5,5%
RBV (%)	50,45	58,72	72,64	81,52	83,56

Tabela 4.39: Valores da estabilidade Marshall das composições das misturas asfálticas.

	Teor 3,5%	Teor 4,0%	Teor 4,5%	Teor 5,0%	Teor 5,5%
Estabilidade (Kgf)	820,88	993,75	1072,48	1009,75	778,92

Com todos os parâmetros obtidos foi possível a confecção dos gráficos que relaciona cada parâmetro ao teor de ligante da mistura asfáltica. A partir daí obtém-se, então, as Figuras de 4.78 a 4.83, as quais irão auxiliar visualmente a escolha do teor ótimo de ligante.

Figura 4.78: Gráfico da densidade máxima teóricas das composições das misturas asfálticas.

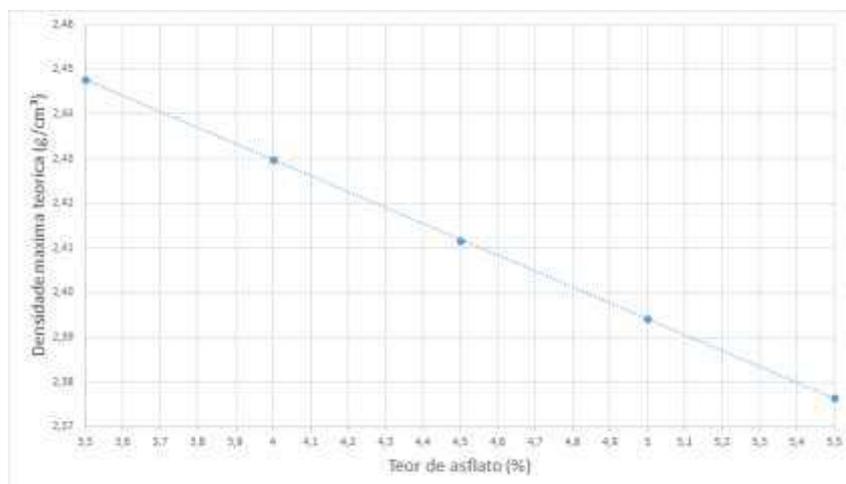


Figura 4.79: Gráfico da massa específica aparente das composições das misturas asfálticas.

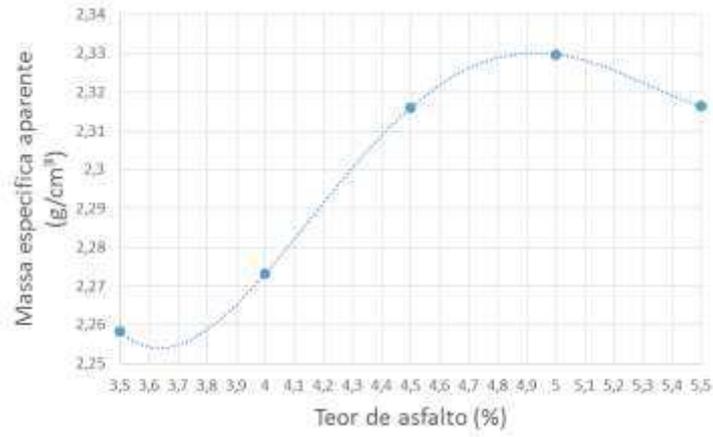


Figura 4.80: Gráfico do volume de vazios das composições de misturas asfálticas.

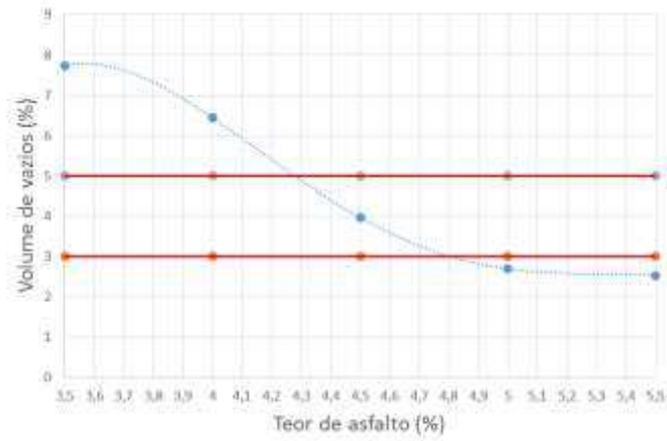


Figura 4.81: Gráfico dos vazios do agregado mineral das composições das misturas asfálticas.

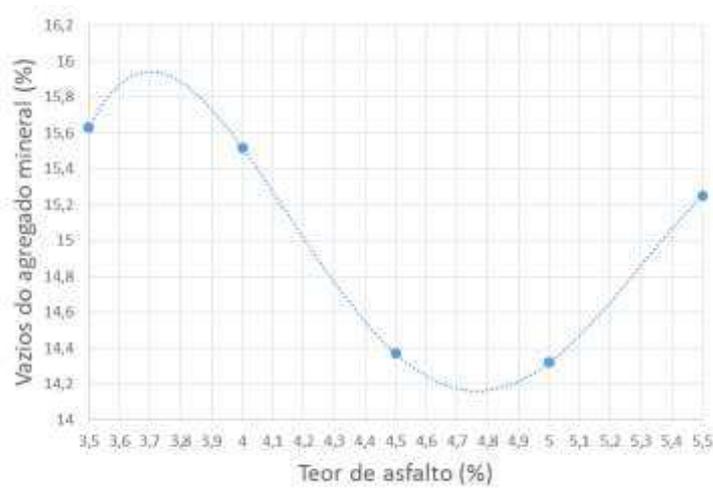


Figura 4.82: Gráfico da relação betume/vazios das composições das misturas asfálticas.

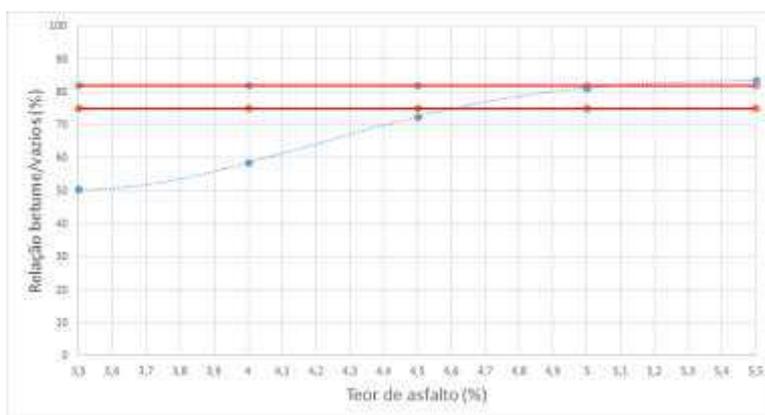
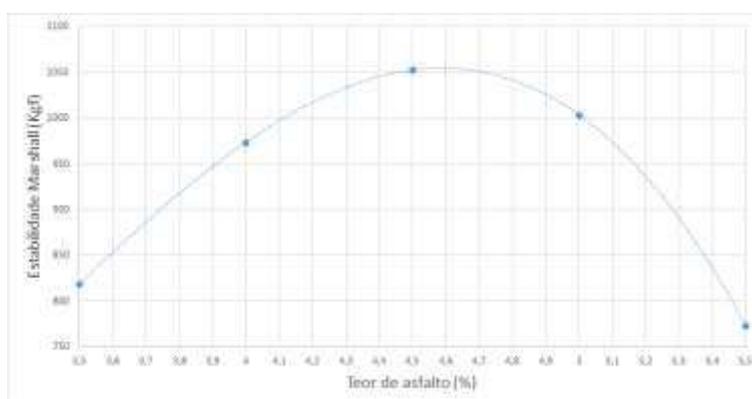


Figura 4.83: Gráfico da estabilidade Marshall das composições das misturas asfálticas.



Através da avaliação dos dados e gráficos é possível determinar o teor ótimo do ligante asfáltico. A norma DNIT ES 385/99 estabelece para as misturas asfálticas da faixa “B” (camada de rolamento) que o volume de vazios deve estar contido dentro da faixa de 3 – 5 % e a relação betume/vazios dentro da faixa de 75 – 82%. Assim, com subsídio do gráfico foram sinalizados os limites para esses parâmetros e aferidos os possíveis teores de ligante que poderiam constituir uma mistura asfáltica atendendo a estes requisitos.

Observar que o teor de 4,6% corresponde às expectativas de volumes de vazios, mas fica no limite da zona de restrição para a relação betume/vazios. Tendo esse fato em vista foi determinado que o teor ótimo de ligante asfáltico para essa composição analisada será de 4,7%, este teor compreende o Vv e o RBV preconizado em norma. Mesmo que a estabilidade seja inferior à do teor de 4,6%, esta se encontra dentro do estabelecido pela norma DNIT ME 043, a qual determina que a estabilidade mínima deva ser de 500 kgf. Com o teor ótimo de ligante foi realizada uma nova compactação, seguindo os mesmos critérios com o teor de ligante de 4,7% para confirmação da avaliação. A Tabela 4.40 mostra a composição granulométrica com o teor ótimo de ligante. As Figuras 4.84, 4.85 e a 4.86 demonstram graficamente os resultados.

Tabela 4.40: Composição granulométrica para o teor de 4,7% de ligante asfáltico.

Brita 25,4	Brita 19,1	Brita 12,7	Pó de Pedra	Areia	Cal	CAP
13,34%	17,15%	28,59%	8,58%	23,83%	3,81%	4,70%
160,10	205,85	343,08	102,92	285,90	45,74	56,40

A compactação resultou nos resultados exposto na Tabela 4.41.

Tabela 4.41: Valores obtidos para a composição de 4,7%.

	DMT (g/cm <sup>3</sup> )	Gmb (g/cm <sup>3</sup> )	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidade Marshall (Kgf)
Mistura asfáltica com o teor de 4,7%	2,4167	2,3371	3,29	14,03	76,52	1039,44

Figura 4.84: Gráfico do volume de vazios das composições de misturas asfálticas.

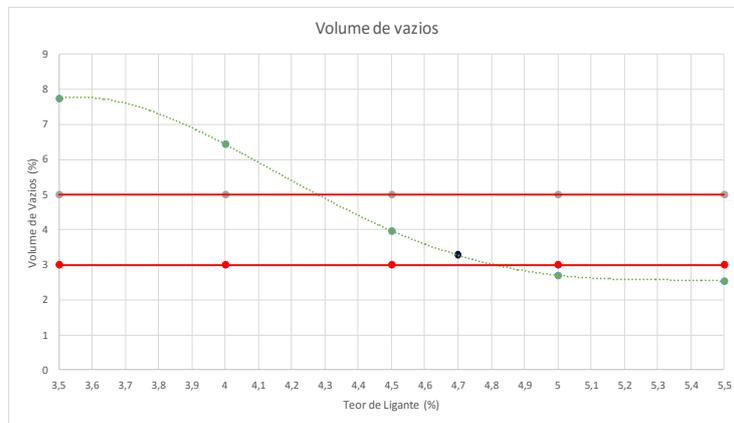


Figura 4.85: Gráfico da relação betume/vazio das composições das misturas asfálticas.

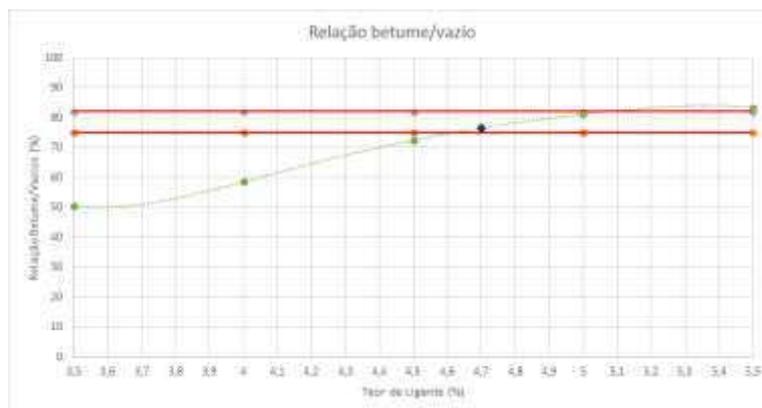
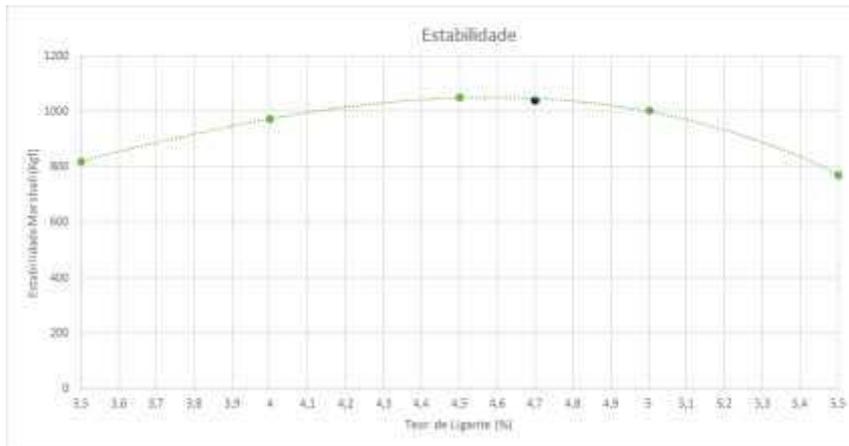


Figura 4.86: Gráfico da estabilidade Marshall das composições das misturas asfálticas.



Assim, ao avaliar os resultados obtidos, foram confirmadas as expectativas para o teor de 4,7% de ligante asfáltico. Dessa forma, o teor ótimo de ligante também foi de 4,7%.

#### 4.6 Dosagem pelo Método Superpave

Considerando que os resultados encontrados nas dosagens do método Superpave com CAP 50/70 e CAP 55/75 foram muito próximos, os resultados a seguir serão demonstrados utilizando apenas os valores encontrados para a dosagem do CAP 50/70. Ressalta-se que o teor ótimo obtido foi comum aos dois ligantes asfálticos utilizados. A distribuição granulométrica dos agregados já foi apresentada na Tabela 4.19 e Figura 4.66.

Tem-se como início da dosagem pelo método Superpave a confecção de composições granulométricas em três situações distintas: composição com aproximação de limite inferior, composição com aproximação do limite intermediário e composição com aproximação do limite superior. As Tabelas 4.42, 4.43 e 4.44 apresentam as distribuições granulométricas relativas a essas composições. Da mesma forma, as Figuras 4.87, 4.88 e 4.89 demonstram graficamente as mesmas.

Tabela 4.42: Composição dos agregados estabelecida com a aproximação do Limite Inferior [Faixa B do DNIT].

FUNTE	BRITA 25		BRITA 19		BRITA 12,5		AREIA		PÓ DE PEDRA		FILLER		PROJETO	ESPECIFICAÇÃO	
	TOTAL	19%	TOTAL	25%	TOTAL	39%	TOTAL	4%	TOTAL	10,6%	TOTAL	3%		Faixa B	
112"	100,00	19,00	100,00	25,00	100,00	39,00	100,00	4,00	100,00	10,00	100,00	3,00	100,00	100	100
1"	100,00	19,00	100,00	25,00	100,00	39,00	100,00	4,00	100,00	10,00	100,00	3,00	100,00	95	100
30"	73,39	13,98	82,26	20,57	100,00	39,00	100,00	4,00	100,00	10,00	100,00	3,00	90,55	89	100
12"	1,62	0,31	11,36	2,84	100,00	39,00	100,00	4,00	100,00	10,00	100,00	3,00	59,15		
30"	0,11	0,02	4,03	1,01	92,39	36,03	100,00	4,00	100,00	10,00	100,00	3,00	54,86	45	89
Nº 4	0,04	0,01	3,09	0,77	40,71	15,88	99,78	3,99	99,86	9,99	100,00	3,00	33,63	28	60
Nº 10	0,04	0,01	2,80	0,70	15,69	5,54	97,62	3,90	81,47	8,13	100,00	3,00	21,10	29	45
Nº 40	0,03	0,01	2,05	0,51	5,44	2,12	59,08	2,36	32,89	3,29	100,00	3,00	11,29	18	32
Nº 80	0,02	0,00	1,27	0,32	2,96	1,15	23,10	0,92	15,10	1,51	99,90	3,00	6,91	8	20
Nº 200	0,01	0,00	0,65	0,16	1,44	0,56	7,02	0,28	6,64	0,66	84,48	2,53	4,21	3	8

Figura 4.87: Curva de Fuller da composição dos agregados [Limite Inferior da Faixa B do DNIT].

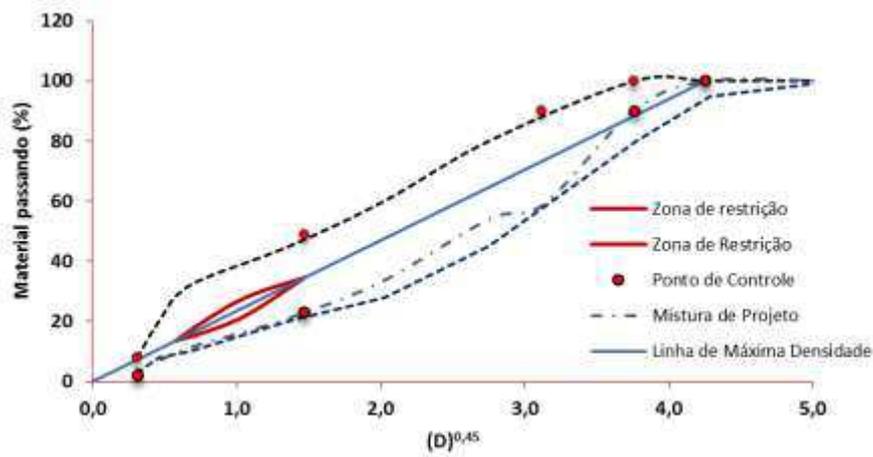


Tabela 4.43: Composição dos agregados estabelecida com a aproximação do Limite Intermediário [Faixa B do DNIT].

P/MIX	BRITA 25		BRITA 19		BRITA 12,5		AREIA		PÓ DE PEDRA		FILLER		PROJETO	ESPECIFICAÇÃO	
	TOTAL	14%	TOTAL	19%	TOTAL	30%	TOTAL	9%	TOTAL	25,0%	TOTAL	3%		Faixa B	
1 1/2"	100,00	14,00	100,00	19,00	100,00	30,00	100,00	9,00	100,00	25,00	100,00	3,00	100,00	100	100
1"	100,00	14,00	100,00	19,00	100,00	30,00	100,00	9,00	100,00	25,00	100,00	3,00	100,00	95	100
3/4"	73,53	10,30	82,26	15,63	100,00	30,00	100,00	9,00	100,00	25,00	100,00	3,00	92,93	90	100
1/2"	1,62	0,23	11,36	2,16	100,00	30,00	100,00	9,00	100,00	25,00	100,00	3,00	69,39		
3/8"	0,11	0,02	4,03	0,77	92,30	27,72	100,00	9,00	100,00	25,00	100,00	3,00	65,50	45	80
Nº 4	0,04	0,01	3,09	0,59	40,71	12,21	99,78	8,98	99,86	24,97	100,00	3,00	49,75	20	60
Nº 10	0,04	0,01	2,80	0,53	13,89	4,11	97,82	8,79	81,47	20,37	100,00	3,00	36,80	20	45
Nº 40	0,03	0,00	2,03	0,39	3,44	1,63	59,08	5,32	32,89	8,22	100,00	3,00	18,56	10	32
Nº 80	0,02	0,00	1,27	0,24	2,96	0,89	23,10	2,08	15,10	3,78	99,90	3,00	9,98	8	20
Nº 200	0,01	0,00	0,65	0,12	1,44	0,43	7,02	0,63	6,64	1,66	84,48	2,53	5,38	3	8

Figura 4.88: Curva de Fuller da composição dos agregados [Limite Intermediário da Faixa B do DNIT].

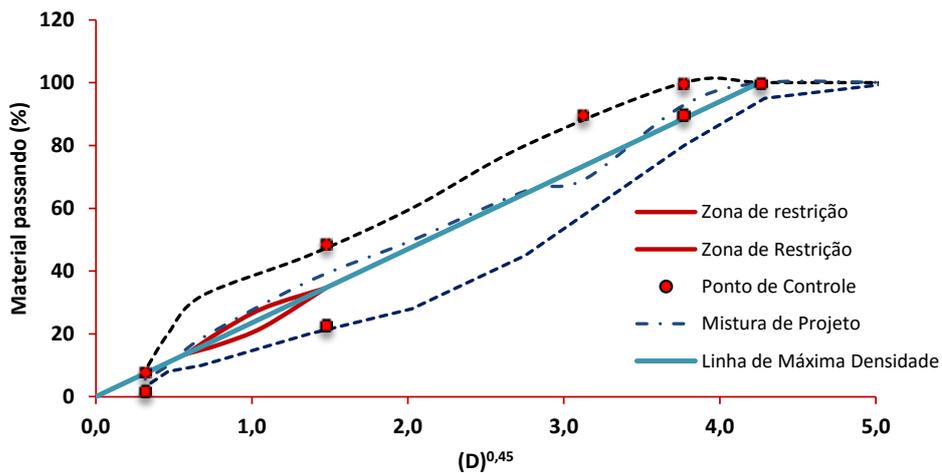
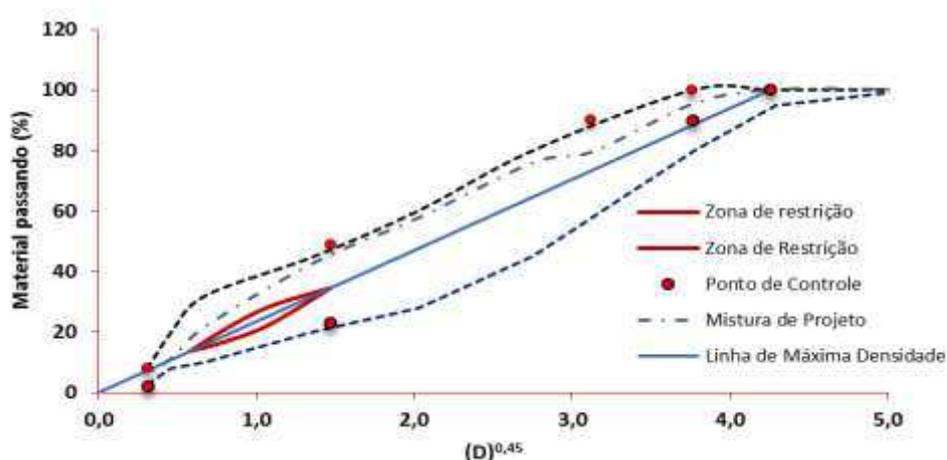


Tabela 4.44: Composição dos agregados estabelecida com a aproximação do Limite Superior [Faixa B do DNIT].

PENEIRA	BRITA 25		BRITA 19		BRITA 12,5		AREIA		PÓ DE PEDRA		FILLER		PROJETO	ESPECIFICAÇÃO	
	TOTAL	9%	TOTAL	13%	TOTAL	35%	TOTAL	13%	TOTAL	27,0%	TOTAL	3%		Faixa B	
112"	100,00	9,00	100,00	13,00	100,00	35,00	100,00	13,00	100,00	27,00	100,00	3,00	100,00	100	100
1"	100,00	9,00	100,00	13,00	100,00	35,00	100,00	13,00	100,00	27,00	100,00	3,00	100,00	95	100
3/4"	73,58	6,62	82,26	10,69	100,00	35,00	100,00	13,00	100,00	27,00	100,00	3,00	95,22	80	100
10"	1,62	0,15	11,36	1,48	100,00	35,00	100,00	13,00	100,00	27,00	100,00	3,00	79,62		
38"	0,11	0,01	4,03	0,52	92,39	32,34	100,00	13,00	100,00	27,00	100,00	3,00	75,87	45	80
Nº 4	0,04	0,00	3,09	0,40	40,71	14,25	99,78	12,97	99,86	26,96	100,00	3,00	57,59	28	60
Nº 10	0,04	0,00	2,80	0,36	13,69	4,79	97,62	12,69	81,47	22,00	100,00	3,00	42,85	20	45
Nº 40	0,05	0,00	2,03	0,26	5,44	1,90	59,08	7,68	32,89	8,88	100,00	3,00	21,73	10	32
Nº 80	0,02	0,00	1,27	0,17	2,96	1,04	23,10	3,00	13,10	4,08	99,90	3,00	11,28	8	20
Nº 200	0,01	0,00	0,65	0,08	1,44	0,50	7,02	0,91	6,64	1,79	84,48	2,53	5,83	3	8

Figura 4.89: Curva de Fuller da composição dos agregados [Limite Superior da Faixa B do DNIT].



Foi determinado como teor de ligante inicial estimado de 4,3% e separados os CPs para compactação. O critério de parada considerado na compactação dos corpos de prova por amassamento foi o número de giros como parâmetro relativo ao tráfego médio/alto. Os valores do número de giros utilizados foram: 8 giros para N inicial, 100 giros para N projeto e 160 giros para o N máximo. Sendo compactados 6 CPs para cada composição. Os resultados obtidos dessas compactações estão listados na Tabela 4.45.

Tabela 4.45: Parâmetros volumétricos em função dos teores de CAPs iniciais.

Mistura	%CAP	%GmmI	%GmmN	%GmmM	%P/A	%Vvp	%Vam	%RBV
1S (Superior)	4,30	91,89	98,21	99,48	1,71	1,79	11,05	65,19
2M (Mediana)	4,30	90,81	95,92	96,75	1,24	4,08	10,32	61,19
3I (Inferior)	4,30	94,58	97,38	97,37	1,12	2,62	9,76	60,14
Critério	4,00	≤ 89,00	≤ 96,00	≤ 98,00	0,6 – 1,2	4,00	≥ 13,00	65 a 75

A curva de composição mediana (2M) com 4,30% de CAP foi a que melhor apresentou resultados, conforme critérios preconizados da dosagem Superpave, pela qual fixa os volumes de vazios em 4%.

#### 4.6.1 Obtenção do Teor Ótimo

Na segunda fase da dosagem foi definida a mistura de trabalho com a escolha de um novo teor, de 4,33% CAP. Nesta fase foram compactados os corpos de prova (Curva Intermediária) com variação sobre o teor de referência de 4,33% nas seguintes proporções:  $\pm 0,5\%$  e  $+1\%$ , ou seja: 3,83%; 4,33%; 4,83% e 5,33%. Sendo separados 24 CPs para compactação, seguindo as composições descritas nas Tabelas 4.46 a 4.49.

Tabela 4.46: Composição granulométrica para o teor de 3,83% de ligante asfáltico.

Brita 25,4	Brita 19,1	Brita 12,7	Pó de Pedra	Areia	Cal	CAP
13,46%	18,27%	28,85%	8,66%	24,04%	2,89%	3,83%
161,57	219,27	346,21	103,86	288,51	34,62	45,96

Tabela 4.47: Composição granulométrica para o teor de 4,33% de ligante asfáltico.

Brita 25,4	Brita 19,1	Brita 12,7	Pó de Pedra	Areia	Cal	CAP
13,39%	18,18%	28,70%	8,61%	23,92%	2,87%	4,33%
160,73	218,13	344,41	103,32	287,01	34,44	51,96

Tabela 4.48: Composição granulométrica para o teor de 4,83% de ligante asfáltico.

Brita 25,4	Brita 19,1	Brita 12,7	Pó de Pedra	Areia	Cal	CAP
13,32%	18,08%	28,55%	8,57%	23,79%	2,86%	4,83%
159,89	216,99	342,61	102,78	285,51	34,26	57,96

Tabela 4.49: Composição granulométrica para o teor de 5,33% de ligante asfáltico.

Brita 25,4	Brita 19,1	Brita 12,7	Pó de Pedra	Areia	Cal	CAP
13,25%	17,99%	28,40%	8,52%	23,67%	2,84%	5,33%
159,05	215,85	340,81	102,24	284,01	34,08	63,96

Com as TU e TC determinadas e os agregados separados foram iniciadas as compactações, nas quais foram aplicados 8 giros para N inicial, 100 giros para N projeto e 160 giros para o N máximo. Os corpos de prova após mistura sofreram envelhecimento, que consiste na aplicação da TC durante um intervalo de tempo de 2 horas, com o intuito de simular o envelhecimento que a mistura sofre em campo. Após o envelhecimento, os corpos de prova foram compactados em uma prensa por amassamento. Em seguida foram determinados os seus diâmetros, espessuras, massa seca e massa submersa em água.

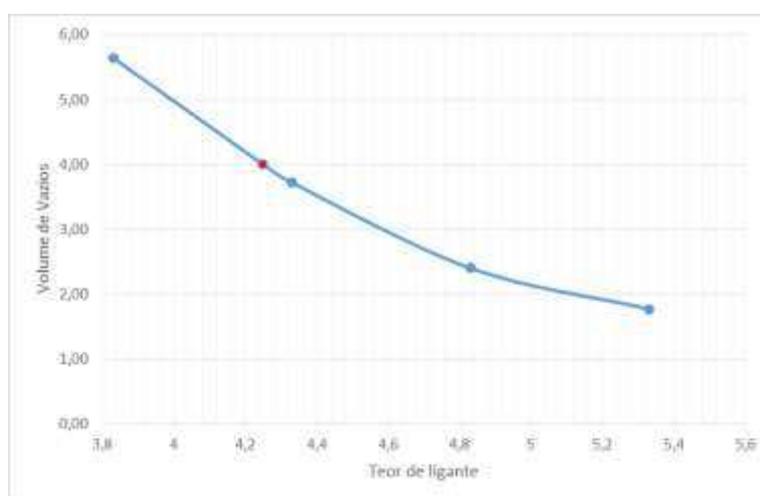
Na Tabela 4.50 são apresentados os resultados dos parâmetros volumétricos resultantes da segunda fase da dosagem.

Tabela 4.50: Dosagem para os teores de CAP estimados (curva intermediária).

Mistura	%GmmI	%GmmN	%GmmM	%P/A	%Vvp	%Vam	%RBV
2M – 3,83% CAP	88,81	94,36	95,24	1,12	5,64	16,04	74,54
2M – 4,33% CAP	90,39	96,28	96,73	1,20	3,72	15,24	73,80
2M – 4,83% CAP	92,80	97,60	97,92	1,20	2,40	15,04	73,68
2M – 5,33% CAP	94,52	98,23	98,60	1,14	1,77	14,90	73,55
Critério	≤ 89,00	≤ 96,00	≤ 98,00	0,6 – 1,2	4,00	≥13,00	65 a 75

Com todos os parâmetros obtidos foi possível a confecção do gráfico que relaciona o volume de vazios ao teor de ligante da mistura asfáltica. Formando a Figura 4.90 que auxiliou visualmente a escolha do teor ótimo de ligante.

Figura 4.90: Gráfico da relação Volume de Vazios e Teor de Ligante.



De acordo com a metodologia SUPERPAVE o teor ótimo deve corresponder ao volume de vazios de 4% para o N Projeto. Sendo assim, o ponto em destaque da Figura 4.90 determina o teor ótimo de ligante para essa composição de mistura asfáltica. Foi então determinado que o teor ótimo de ligante a ser utilizado nessa mistura asfáltica será de 4,22%.

#### 4.7 Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas

Para a análise das propriedades mecânicas foram moldados corpos de prova nos teores ótimos obtidos pelas metodologias Marshall e Superpave, considerando o percentual de 5% dos óleos de Mamona e de Linhaça. Desse modo, foram realizados os ensaios de resistência à tração por compressão diametral – RT, módulo de resiliência, resistência ao dano por umidade induzida (Lottman modificado) – RRT, desgaste Cântabro, fadiga por compressão diametral a tensão controlada e deformação permanente pelo critério diametral (Flow Number).

#### 4.7.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral - RT

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral estão apresentados na Tabela 4.51 e na Figura 4.91 contendo as médias a partir de 3 (três) corpos de prova ensaiados. A metodologia utilizada seguiu o preconizado na norma DNIT ME 136/2010 do DNIT.

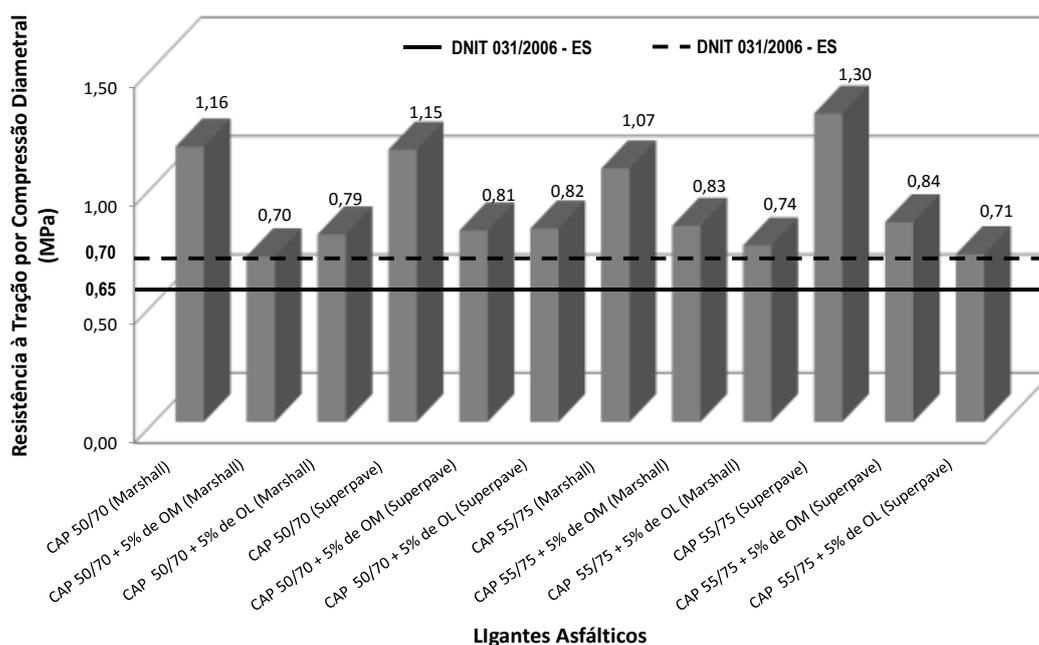
Os maiores resultados de RT foram obtidos com os ligantes puros, sendo o maior para amostra de CAP 55/75 com RT = 1,30 MPa (Superpave). As amostras de CAP 50/70, compactadas por amassamento no compactador giratório (Superpave), foram aquelas que resultaram em maiores valores em comparação com as compactadas por impacto (Marshall). Para o CAP 50/70 com adição na compactação Marshall o maior valor obtido de 0,79 MPa foi para 5% de OL. Em contrapartida, para a compactação Superpave o valor obtido com 5% de OL (0,82 MPa) foi pouco superior ao com 5% de OM (0,81 MPa).

Para as amostras com o CAP modificado com SBS com adição o maior valor foi de 0,84 MPa com OM na compactação Superpave, seguido de 0,83 MPa na compactação Marshall. Nota-se que os maiores valores de OL foram conseguidos com o CAP puro e os maiores com o OM com o CAP modificado. O OL contribui aumentando a rigidez da mistura com CAP 50/70 com maiores RT's, enquanto que OM possibilita o aumento de RT nas misturas asfálticas com CAP 55/75.

Tabela 4.51: Resultados de resistência à tração por compressão diametral.

Resistência a Tração (MPa)				
Amostras	CP 1	CP 2	CP 3	Média
CAP 50/70 (Marshall)	1,13	1,19	1,17	1,16
CAP 50/70 + 5% de OM (Marshall)	0,85	0,63	0,62	0,70
CAP 50/70 + 5% de OL (Marshall)	0,77	0,81	0,79	0,79
CAP 50/70 (Superpave)	1,21	1,13	1,11	1,15
CAP 50/70 + 5% de OM (Superpave)	0,7	0,87	0,85	0,81
CAP 50/70 + 5% de OL (Superpave)	0,8	0,82	0,83	0,82
CAP 55/75 (Marshall)	1,05	1,09	1,07	1,07
CAP 55/75 + 5% de OM (Marshall)	0,82	0,84	0,82	0,83
CAP 55/75 + 5% de OL (Marshall)	0,73	0,76	0,74	0,74
CAP 55/75 (Superpave)	1,25	1,34	1,31	1,30
CAP 55/75 + 5% de OM (Superpave)	0,89	0,84	0,80	0,84
CAP 55/75 + 5% de OL (Superpave)	0,75	0,67	0,70	0,71

Figura 4.91: Gráfico da Resistência à tração por compressão diametral.



Observa-se na Figura 4.91 que todas as amostras apresentaram RT maiores que 0,65 MPa, conforme o preconizado na norma DNIT 031/2006 – ES para CBUQ com CAP convencional e também maior que 0,70 MPa, conforme estabelece a norma DNIT-ES 385/99.

Um análise geral dos resultados permite apontar uma queda da RT com a adição dos óleos de Mamona de Linhaça para o CAP convencional e modificado. O maior valor de RT, 1,30 MPa, foi obtido para amostra de CAP 55/75 (Superpave), seguido da amostra de CAP 50/70 (Marshall) com RT de 1,16 MPa.

#### 4.7.2 Módulo de Resiliência - MR

A análise do módulo de resiliência é, de certo modo, bastante complexa visto que valores maiores ou menores não podem ser analisados isoladamente, pois dependerá da estrutura do pavimento e da posição que o material estará inserido. Torna-se imprescindível a compatibilização da rigidez entre as camadas, de forma a suportar os esforços oriundos do tráfego.

Segundo PINTO (1991) o ensaio de tração indireta por compressão diametral de cargas repetidas é empregado para a determinação do módulo de resiliência de misturas asfálticas, já que simula o comportamento mecânico dos revestimentos na região onde ocorrem deformações de tração, responsáveis pela fadiga da camada e, conseqüentemente, pela vida de serviço da estrutura.

Destaca-se, como é de conhecimento da comunidade acadêmica, que a maioria dos materiais utilizados na pavimentação não são elásticos, contudo, se a carga aplicada é pequena quando comparada à resistência do material e é repetida por um número elevado de vezes (geralmente, acima de 200), a

deformação sofrida pelo material é quase completamente recuperável e pode ser considerada como elástica (HUANG, 1993 apud VASCONCELOS, 2004).

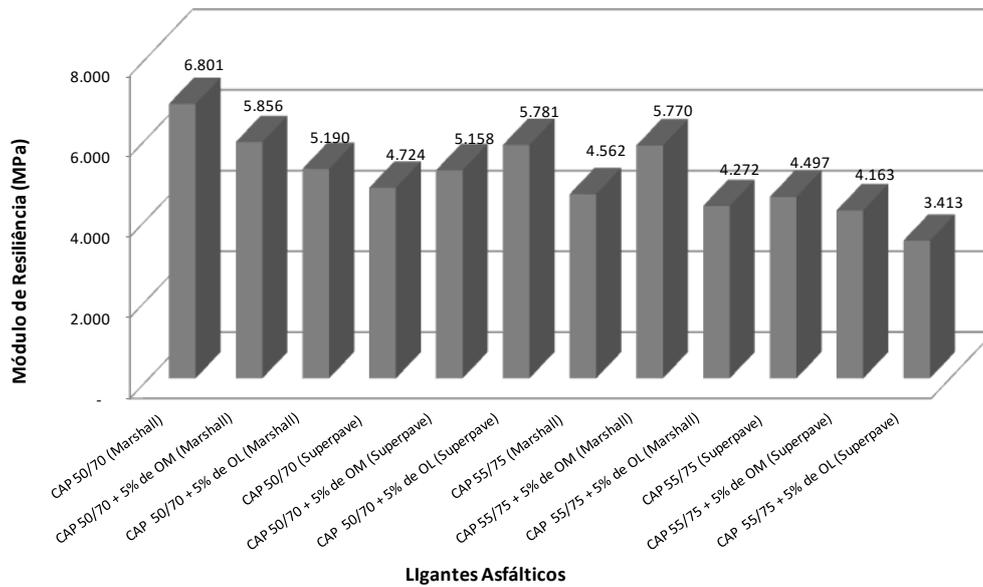
Segundo Vasconcelos (2004) o módulo de resiliência é a relação entre a tensão de tração ( $\sigma_t$ ), aplicada repetidamente no plano diametral de uma amostra cilíndrica, e a deformação específica recuperável ( $\epsilon_t$ ) correspondente à tensão aplicada, a uma determinada temperatura (T).

Na Tabela 4.52 e no gráfico da Figura 4.92 constam os resultados dos módulos de resiliência médios obtidos a partir de dois corpos de prova. Dentre todas as amostras o CAP 50/70 na compactação Marshall apresentou maior valor de MR (6.801 MPa), seguido do CAP 50/70 + 5% de OM (5.855 MPa), também na compactação Marshall. O maior MR com adição de OL foi obtido para a amostra de CAP 50/70 + 5% de OL com 5.781 MPa (Superpave). O menor valor de MR foi obtido para a amostra de CAP 55/75 + OL na compactação Superpave (3.412 MPa).

Tabela 4.52: Resultados de módulo de resiliência a 25°C.

<b>Módulo de Resiliência (MPa)</b>			
<b>Amostras</b>	<b>CP 1</b>	<b>CP 2</b>	<b>Média</b>
CAP 50/70 (Marshall)	7.083	6.519	6.801
CAP 50/70 + 5% de OM (Marshall)	5.999	5.712	5.856
CAP 50/70 + 5% de OL (Marshall)	4.927	5.453	5.190
CAP 50/70 (Superpave)	4.610	4.838	4.724
CAP 50/70 + 5% de OM (Superpave)	5.385	4.930	5.158
CAP 50/70 + 5% de OL (Superpave)	6.143	5.419	5.781
CAP 55/75 (Marshall)	5.349	3.775	4.562
CAP 55/75 + 5% de OM (Marshall)	5.797	5.742	5.770
CAP 55/75 + 5% de OL (Marshall)	4.531	4.013	4.272
CAP 55/75 (Superpave)	3.924	5.071	4.497
CAP 55/75 + 5% de OM (Superpave)	3.785	4.541	4.163
CAP 55/75 + 5% de OL (Superpave)	3.337	3.488	3.413

Figura 4.92: Gráfico dos módulos de Resiliência.

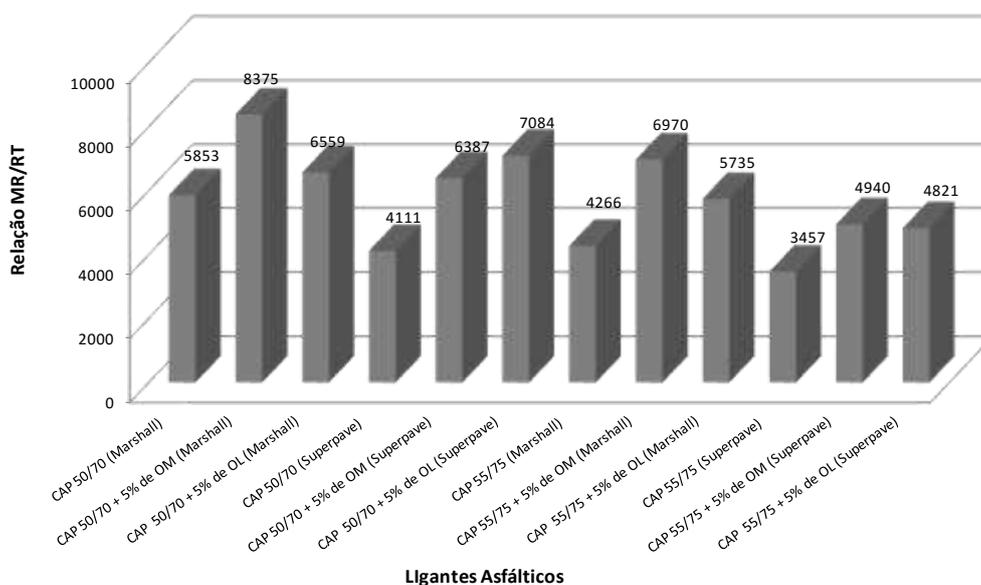


Foi também avaliada a relação entre o valor de MR/RT, uma vez que essa relação é um indicativo da compatibilidade entre a rigidez e a resistência da mistura asfáltica. Misturas asfálticas com módulos de resiliência elevados, muito rígidas, necessitam de valores elevados de resistência à tração devido à concentração de esforços no seu interior (TADEU JUNIOR, 2008).

Segundo SOARES et. al. (2002) para misturas CBUQ na faixa C do DNIT, que utilizaram o CAP 50/60 oriundo do petróleo venezuelano Bachaquero, os resultados encontrados por esses autores variaram de 3.000 a 3.500. Porém, há de se considerar que o CAP utilizado é o 50/70 e sua origem não é a Bachaquero que, bem como, o Boscan são reconhecidos mundialmente como os de melhor qualidade para a produção de asfalto para pavimentação por possuírem maiores resíduos de asfalto (Pinto, 1991; Leite, 1999; Shell, 2003).

Com base da Figura 4.93, em geral, pode-se extrair que os valores da relação entre MR e RT apresentaram valores bem superiores ao sugerido por SOARES et. al. (2002). A amostra de CAP 50/70 + 5% de OM compactada no Marshall foi aquela com o maior valor para relação MR/RT com 8375, indicando assim uma maior susceptibilidade ao trincamento, visto que possui um alto valor de MR e baixo de RT. A amostra de CAP 55/75, por sua vez, apresentou o menor valor para a MR/RT de 4266 que, neste caso, apresentou uma correlação com o ensaio de fadiga a baixos níveis de deformação específica (ver Tabela 4.52). As menores relações foram obtidas com amostras compactadas pelo Superpave, com exceção do CAP 55/75 (Marshall).

Figura 4.93: Gráfico da Relação entre MR/RT.



#### 4.7.3 Resistência ao Dano por Umidade Induzida (Lottman modificado) – RRt

A resistência à ação deletéria da água nas misturas asfálticas é função de uma gama de fatores, cita-se: o tipo de agregado, as características do ligante asfáltico, as propriedades da mistura, dentre outros. Na presente pesquisa buscou-se avaliar o desempenho mecânico das misturas asfálticas sob a ação nociva da água a partir de corpos de prova moldados pelos métodos Marshall e Superpave para dois tipos de ligantes. Um puro o CAP 50/70 e outro modificado por polímero SBS o CAP 55/75 com adição de 5% de OM e OL, mantendo as demais condicionantes constantes, a faixa granulométrica, o tipo de Filer e o teor de ligante. Sendo assim, o elemento determinante no desempenho das misturas ensaiadas ao dano por umidade induzida foram os óleos de Mamona e de Linhaça. Na Tabela 4.53 constam as médias dos resultados de resistências à tração por compressão diametral das amostras sem e com condicionamento,  $RT_{NC}$  e  $RT_C$ , assim como a resistência retida à tração RRt.

As misturas asfálticas com adições de OM e OL foram aquelas com melhores desempenhos de resistência à umidade induzida. Refletindo assim em uma maior adesividade entre o ligante e o agregado. Todas as misturas atenderam ao requerido na norma AASHTO T283/99 ( $RRt \geq 70\%$ ). E pelo método Superpave ( $RRt \geq 80\%$ ) as misturas CAP 55/75 + 5% de OL, CAP 50/70 + 5% de OM (Marshall), CAP 50/70 + 5% de OL (Marshall), CAP 55/75 + 5% de OM (Superpave), CAP 55/75 + 5% de OM (Marshall) e CAP 55/75 + 5% de OL (Marshall) atenderam ao estabelecido pelo referido método.

Notadamente, vale destacar os três melhores resultados, primeiro para a mistura de CAP 55/75 + 5% de OL (Superpave) que apresentou  $RRt = 92,5\%$ , ou seja, 32% maior que o CAP 55/75 (Superpave). Em seguida, para a mistura de CAP 50/70 + 5% de OM (Marshall) com  $RRt = 88,7\%$ , sendo 19% superior a

mistura de CAP 50/70 (Superpave). E por fim, a mistura de CAP 50/70 + 5% de OL (Marshall) com RRT = 86,6% que é pouco mais que 9% maior do que o CAP 50/70 (Marshall).

No gráfico constante na Figura 4.94 demonstram-se os melhores resultados para as misturas com adição dos óleos de Mamona e de Linhaça. Em vista disso, essa constatação é sobremaneira importante, pois a causa de defeitos como a desagregação e o descolamento (stripping) em revestimentos asfálticos são geralmente atribuídos à problemas na ligação adesiva desenvolvida na interface agregado-ligante que, aliada as ações do tráfego e da água, contribuem para gradação dos danos, ocasionando o aparecimento de buracos e panelas (FURLAN, 2006).

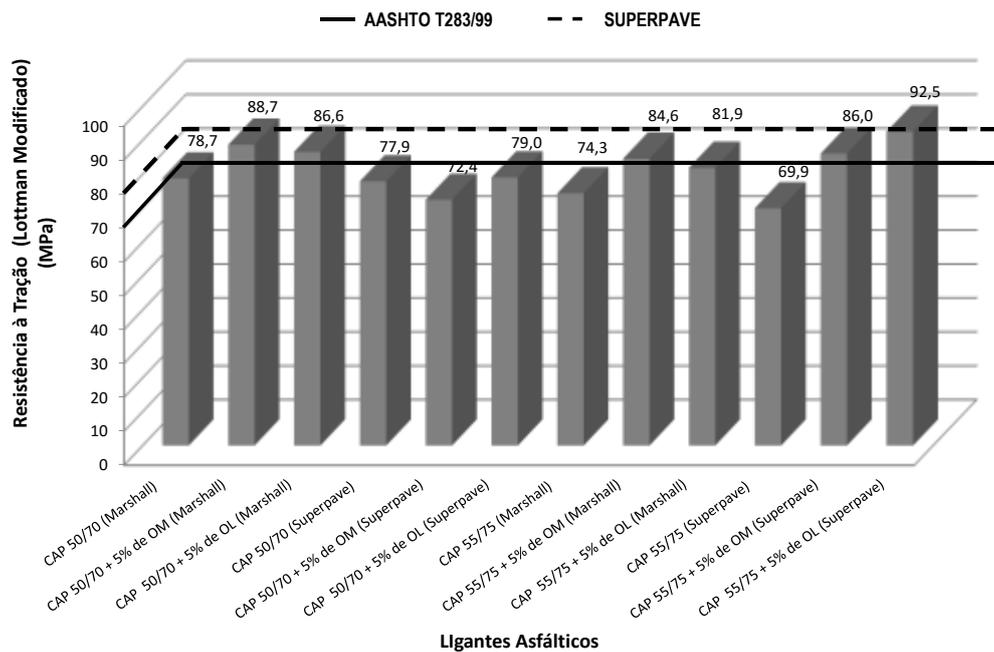
Em complemento, define-se o termo Stripping comumente como “a perda de adesão entre a superfície do agregado e o ligante asfáltico na presença de umidade”. Um concreto asfáltico pode perder resistência na presença de umidade sem evidências visíveis de descolamento, devido à perda da coesão do ligante asfáltico pela água. Assim, os termos “susceptibilidade à água” e “sensibilidade à água” são frequentemente usados para designar a perda de resistência ou de outras propriedades das misturas asfálticas na presença de água (LITTLE e EPPS, 2001 apud Tadeu Junior 2008).

Por este motivo, os bons resultados conseguidos de resistência à umidade induzida com as misturas contendo adição dos óleos de Mamona e de Linhaça podem ser atribuídos também a adição do fíler cal hidratada, cujos benefícios como agente melhorador de adesividade em misturas asfáltica vêm sendo relatados na literatura por diversos autores (LITTLE e EPPS, 2001; CURTIS, 1990; SEBAALY et. al., 2001; SEBAALY et. al., 2003, BARDINI et. al., 2010, GRANDE, 2011).

Tabela 4.53: Resultados do ensaio de dano por umidade induzida (Lottman Modificado).

<b>Amostras</b>	<b>RT<sub>NC</sub> (MPa)</b>	<b>RT<sub>C</sub> (MPa)</b>	<b>RRT (MPa)</b>
CAP 50/70 (Marshall)	1,16	0,92	78,7
CAP 50/70 + 5% de OM (Marshall)	0,70	0,62	88,7
CAP 50/70 + 5% de OL (Marshall)	0,79	0,69	86,6
CAP 50/70 (Superpave)	1,15	0,90	77,9
CAP 50/70 + 5% de OM (Superpave)	0,81	0,59	72,4
CAP 50/70 + 5% de OL (Superpave)	0,82	0,65	79,0
CAP 55/75 (Marshall)	1,07	0,80	74,3
CAP 55/75 + 5% de OM (Marshall)	0,83	0,70	84,6
CAP 55/75 + 5% de OL (Marshall)	0,74	0,61	81,9
CAP 55/75 (Superpave)	1,30	0,91	69,9
CAP 55/75 + 5% de OM (Superpave)	0,84	0,73	86,0
CAP 55/75 + 5% de OL (Superpave)	0,71	0,66	92,5

Figura 4.94: Gráfico dos resultados do ensaio de dano por umidade induzida (Lottman Modificado).



#### 4.7.4 Resistência ao Desgaste Cântabro

Segundo Babadopulos (2008) uma patologia comum nos revestimentos brasileiros é o desgaste, processo pelo qual ocorre arrancamento progressivo de agregados do revestimento causado pelo atrito entre pneu e pavimento. O ensaio usualmente utilizado para simular esse problema é o desgaste Cântabro, desenvolvido na Espanha com o objetivo de avaliar o comportamento de misturas asfálticas porosas quanto à perda de material, mas que já foi utilizado comumente em outros tipos de revestimentos, como concretos asfálticos (CA) e misturas areia-asfalto.

Segundo Rohde (2007), embora o ensaio tenha sido desenvolvido para misturas de granulometria aberta, este método tem sido empregado também em misturas densas. A perda de coesão está ligada à redução de rigidez do cimento asfáltico e ao enfraquecimento das ligações ligante/agregado causando uma redução severa na resistência e integridade da mistura (FURLAN et. al. 2004). Sendo assim, para avaliar a coesão das misturas asfálticas foi realizado o ensaio de desgaste Cântabro em conformidade com a norma DNIT ME 383 (1999). Na Tabela 4.54 e Figura 4.95 constam os resultados obtidos no ensaio de perda de massa por desgaste realizado em amostras a temperatura de 25°C, com corpos de prova compactados pelos métodos Marshall e Superpave.

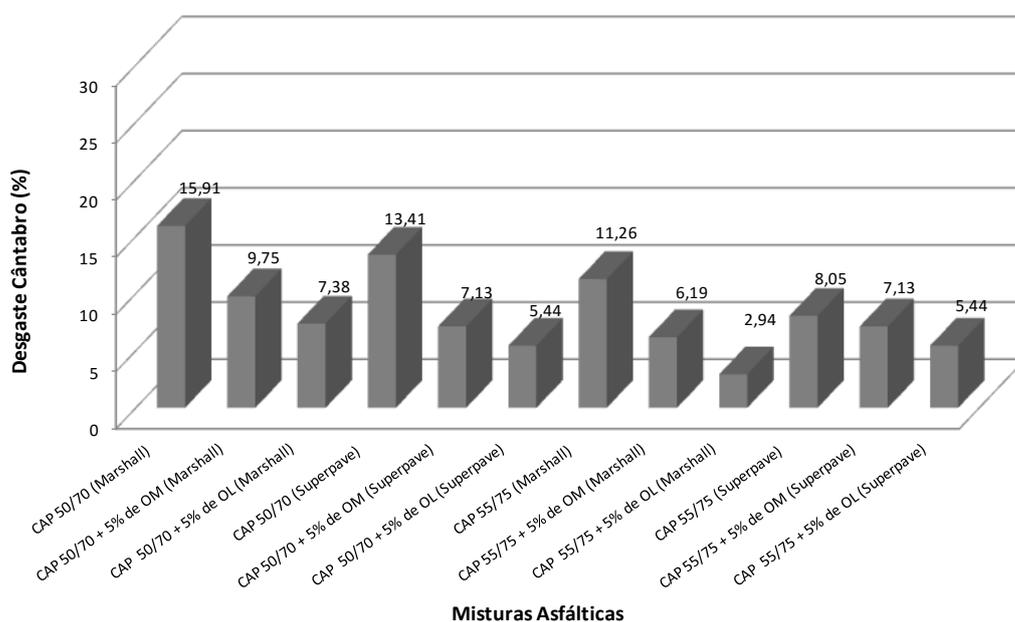
Observa-se na Tabela 4.54 que as misturas com maiores resistências ao desgaste Cântabro foram àquelas constituídas por adição de OM e OL ao CAP com polímero. A mistura de CAP 55/75 + 5% de OL (Marshall) apresentou desgaste de apenas 2,94% e 5,44% para corpo de prova compactado no método Superpave. Ainda, para o CAP 50/70 + 5% de OL (Superpave) o desgaste foi de 5,44%. Constata-se um

melhor desempenho da adição de OL na resistência ao desgaste em comparação com o OM, indicando assim uma melhor coesão dessas misturas, visivelmente ilustradas no gráfico da Figura 4.95.

Tabela 4.54: Resultados do ensaio de desgaste Cântabro.

Misturas Asfálticas	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	DESGASTE (%)
CAP 50/70 (MARSHALL)	1196,0	1005,7	15,91
CAP 50/70 + 5% DE OM (MARSHALL)	1193,3	1076,9	9,75
CAP 50/70 + 5% DE OL (MARSHALL)	1196,5	1108,2	7,38
CAP 50/70 (SUPERPAVE)	1199,2	1038,4	13,41
CAP 50/70 + 5% DE OM (SUPERPAVE)	1199,8	1114,3	7,13
CAP 50/70 + 5% DE OL (SUPERPAVE)	1190,2	1125,5	5,44
CAP 55/75 (MARSHALL )	1189,9	1055,9	11,26
CAP 55/75 + 5% DE OM (MARSHALL)	1199,5	1125,2	6,19
CAP 55/75 + 5% DE OL (MARSHALL)	1198,6	1163,4	2,94
CAP 55/75 (SUPERPAVE)	1201,5	1104,8	8,05
CAP 55/75 + 5% DE OM (SUPERPAVE)	1199,8	1114,3	7,13
CAP 55/75 + 5% DE OL (SUPERPAVE)	1190,2	1125,5	5,44

Figura 4.95: Gráfico dos resultados do ensaio de desgaste Cântabro.



#### 4.7.5 Resultado do Ensaio de Fadiga a Tensão Controlada

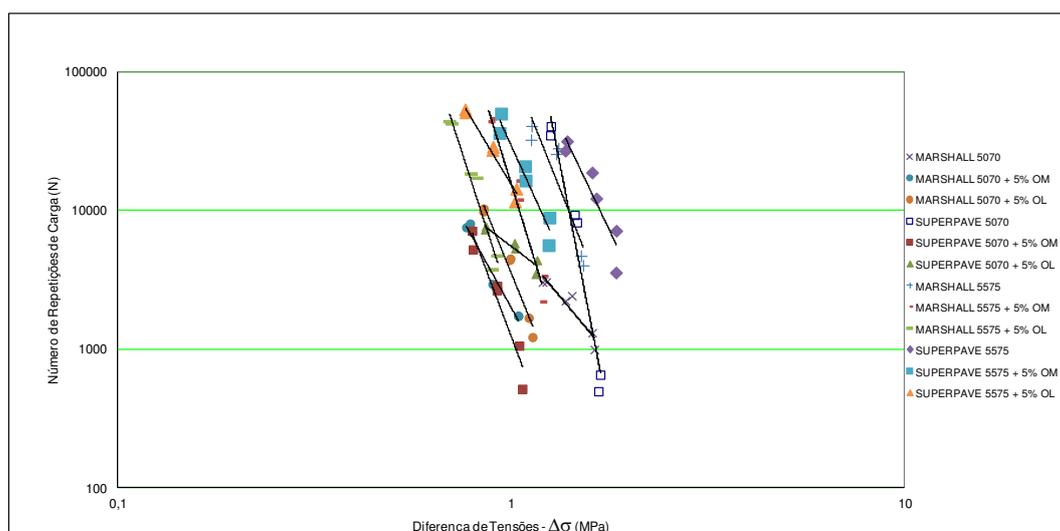
O comportamento à fadiga das misturas asfálticas foi analisado a tensão controlada. Foram moldados corpos de prova compactados, conforme os métodos Marshall e Superpave. A vida de fadiga obtida foi em função da diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ ) e deformação resiliente específica ( $\epsilon_i$ ). Inicialmente, conforme pondera Spech (2004), a análise direta dos modelos ou das curvas pode levar a conclusões equivocadas, visto que as misturas possuem diferentes módulos elásticos e, conseqüentemente, distribuem tensões de maneira divergente. Neste sentido, segundo Tadeu Junior (2008), uma análise empírico-mecânica do sistema pavimento e subleito se configura como uma avaliação mais conclusiva.

Na Tabela 4.55 constam os modelos de fadiga, obtidos por regressão, expressos em função da diferença de tensões verticais de compressão e horizontais de tração medidas no centro do corpo de prova. Nos modelos apresentados os parâmetros  $k_1$  e  $n_1$  representam os coeficientes do modelo e o coeficiente  $R^2$  representa a qualidade de ajuste do modelo. E na Figura 4.96 constam os gráficos dos modelos de fadiga em função da diferença de tensões.

Tabela 4.55: Modelo de fadiga em função da diferença de tensões.

Misturas Asfálticas	Modelo	R <sup>2</sup>	k1	n1
CAP 50/70 (Marshall)	$y=6259,8x^{-3,395}$	0,89	6259,80	-3,395
CAP 50/70 + 5% de OM (Marshall)	$y=1976,9x^{-5,121}$	0,96	1976,90	-5,121
CAP 50/70 + 5% de OL (Marshall)	$y=3500,9x^{-7,00}$	0,97	3500,90	-7,000
CAP 50/70 (Superpave)	$y=1e6x^{-14,59}$	0,96	1000000,00	-14,590
CAP 50/70 + 5% de OM (Superpave)	$y=1221,8x^{-7,545}$	0,94	1221,80	-7,545
CAP 50/70 + 5% de OL (Superpave)	$y=5479,26x^{-2,142}$	0,91	5479,26	-2,142
CAP 55/75 (Marshall)	$y=107388x^{-7,09}$	0,84	107388,00	-7,090
CAP 55/75 + 5% de OM (Marshall)	$y=15364x^{-9,233}$	0,96	15364,00	-9,233
CAP 55/75 + 5% de OL (Marshall)	$y=2067,9x^{-8,781}$	0,95	2067,90	-8,781
CAP 55/75 (Superpave)	$y=216677x^{-5,933}$	0,87	216677,00	-5,933
CAP 55/75 + 5% de OM (Superpave)	$y=29099x^{-6,25}$	0,93	29099,00	-6,250
CAP 55/75 + 5% de OL (Superpave)	$y=15256x^{-4,713}$	0,97	15256,00	-4,713

Figura 4.96: Gráfico dos modelos de fadiga em função da diferença de tensões.



Uma forma de hierarquizar o comportamento à fadiga das misturas em laboratório conforme Morilha Junior (2004) e utilizada por Tadeu Junior (2008) foi também utilizada na presente tese. Consistiu, basicamente, em adotar três níveis de diferença de tensões: 0,5 MPa (nível baixo); 1,0 MPa (nível médio) e 2,0 MPa (nível alto). Desse modo, aplicaram-se nos modelos os três níveis de diferença de tensões, as quais possibilitaram hierarquizar as misturas quanto à vida de fadiga em função da diferença de tensões, sendo a ordem 1 aquela que indicou a mistura com melhor comportamento em laboratório e assim sucessivamente, conforme Tabela 4.56.

Tabela 4.56: Variação da vida de fadiga com o nível de diferença de tensões aplicado.

Amostras	Modelo	R <sup>2</sup>	Δσ = 0,5 MPa	Ordem	Δσ = 1,0 MPa	Ordem	Δσ = 2,0 MPa	Ordem
CAP 50/70 (Marshall)	Nf=6259,8Δσ <sup>-3,395</sup>	0,89	6,59E+04	11	6,26E+03	10	5,95E+02	5
CAP 50/70 + 5% de OM (Marshall)	Nf=1976,9Δσ <sup>-5,121</sup>	0,96	6,88E+04	10	1,98E+03	11	5,68E+01	8
CAP 50/70 + 5% de OL (Marshall)	Nf=3500,9Δσ <sup>-7,00</sup>	0,97	4,48E+05	7	3,50E+03	8	2,73E+01	9
CAP 50/70 (Superpave)	Nf=1e6Δσ <sup>-14,59</sup>	0,96	1,05E+07	3	1,00E+06	1	9,51E+04	1
CAP 50/70 + 5% de OM (Superpave)	Nf=1221,8Δσ <sup>-7,545</sup>	0,94	2,28E+05	9	1,22E+03	12	6,54E+00	11
CAP 50/70 + 5% de OL (Superpave)	Nf=5479,26Δσ <sup>-2,142</sup>	0,91	2,42E+04	12	5,48E+03	7	1,24E+03	3
CAP 55/75 (Marshall)	Nf=107388Δσ <sup>-7,09</sup>	0,84	1,46E+07	1	1,07E+05	3	7,88E+02	4
CAP 55/75 + 5% de OM (Marshall)	Nf=15364Δσ <sup>-9,233</sup>	0,96	9,25E+06	4	1,54E+04	5	2,55E+01	10
CAP 55/75 + 5% de OL (Marshall)	Nf=2067,9Δσ <sup>-8,781</sup>	0,95	8,96E+05	6	2,04E+03	9	4,63E+00	12
CAP 55/75 (Superpave)	Nf=216677Δσ <sup>-5,933</sup>	0,87	1,32E+07	2	2,17E+05	2	3,55E+03	2
CAP 55/75 + 5% de OM (Superpave)	Nf=29099Δσ <sup>-6,25</sup>	0,93	1,45E+06	5	1,91E+04	4	2,51E+02	7
CAP 55/75 + 5% de OL (Superpave)	Nf=15256Δσ <sup>-4,713</sup>	0,97	4,00E+05	8	1,53E+04	6	5,82E+02	6

Nos modelos obtidos o coeficiente “n” indica a inclinação da curva. No caso dos modelos de representação por diferença de tensões “n<sub>1</sub>” indica a suscetibilidade ao estado de tensões, ou seja, maiores valores de “n<sub>1</sub>” indicam maior sensibilidade do comportamento à fadiga das misturas em relação às mudanças na diferença de tensões, conforme Tadeu Junior (2008).

Neste sentido, os três maiores valores de n<sub>1</sub> foram obtidos, em ordem decrescente, pela mistura CAP 50/70, compactado pelo método Superpave, seguida do CAP 55/75 com compactação também Superpave e, por fim, pela mistura de CAP 55/75 na compactação Marshall. Indicando assim, uma maior sensibilidade à diferença de tensões para essas misturas.

Segundo MAGALHÃES (2004) essa maior suscetibilidade se reflete no maior risco da mistura sofrer trincamento prematuro devido à erros de projeto ou construtivo, significando que pequenas variações nas espessuras das camadas podem acarretar em redução expressiva na vida de fadiga da estrutura.

Observa-se na Tabela 4.56 que para o menor nível de diferença de tensões de 0,5 MPa a mistura com melhor comportamento à fadiga é a mistura de CAP 55/75 (Marshall). Para os níveis de 1,0 MPa e 2,0 MPa sobressai-se a mistura de CAP 50/70 (Superpave). Dentre as misturas com adição de óleo, no caso do nível mais baixo, a mistura de CAP 55/75 + 5% de OM (Marshall) foi a de melhor vida de fadiga. Para o nível médio de 1,0 foi a mistura de CAP 55/75 + 5% de OM (Marshall) e para o maior nível de 2,0 MPa foi a mistura de CAP 50/70 + 5% de OL (Superpave).

Da mesma forma, foi feita a análise para a deformação resiliente específica, cujos modelos obtidos através de regressão constam na Tabela 4.57. Nos modelos apresentados os parâmetros k<sub>2</sub> e n<sub>2</sub> representam os coeficientes do modelo e o coeficiente R<sup>2</sup> representa a qualidade de ajuste do modelo.

Na Figura 4.97 apresenta-se o gráfico da vida de fadiga em função da deformação resiliente específica de todas as misturas ensaiadas. Similarmente a análise realizada para a fadiga em função da diferença de tensões, adotou-se três níveis de deformações de resiliência: 2.10<sup>-5</sup> cm/cm (nível baixo); 4.10<sup>-5</sup> cm/cm (nível médio) e 6.10<sup>-5</sup> cm/cm (nível alto).

Os resultados estão contidos na Tabela 4.58 e indicam que o melhor comportamento à fadiga para o nível de menor deformação foi para a mistura de CAP 50/70 (Superpave) e, para os níveis médios e altos, para a mistura de CAP 55/75 (Marshall). De fato, é de se esperar que as misturas com CAP modificado apresentem uma melhor vida de fadiga para maiores deformações resilientes específicas.

Tabela 4.57: Modelo de fadiga em função da deformação resiliente específica.

Misturas Asfálticas	Modelo	R <sup>2</sup>	k2	n2
CAP 50/70 (Marshall)	$y=5E-12x^{-3,395}$	0,89	5,00E-12	-3,395
CAP 50/70 + 5% de OM (Marshall)	$y=8E-20x^{-5,121}$	0,96	8,00E-20	-5,121
CAP 50/70 + 5% de OL (Marshall)	$y=8E-28x^{-7,00}$	0,97	8,00E-28	-7,000
CAP 50/70 (Superpave)	$y=6E-57x^{-14,59}$	0,96	6,00E-57	-14,590
CAP 50/70 + 5% de OM (Superpave)	$y=1E-30x^{-7,545}$	0,94	1,00E-30	-7,545
CAP 50/70 + 5% de OL (Superpave)	$y=2E-06x^{-2,142}$	0,91	2,00E-06	-2,142
CAP 55/75 (Marshall)	$y=1E-23x^{-7,09}$	0,84	1,00E-23	-7,090
CAP 55/75 + 5% de OM (Marshall)	$y=8E-37x^{-9,233}$	0,96	8,00E-37	-9,233
CAP 55/75 + 5% de OL (Marshall)	$y=1E-34x^{-8,781}$	0,95	1,00E-34	-8,781
CAP 55/75 (Superpave)	$y=1E-19x^{-5,933}$	0,87	1,00E-19	-5,933
CAP 55/75 + 5% de OM (Superpave)	$y=7E-24x^{-6,25}$	0,93	7,00E-24	-6,250
CAP 55/75 + 5% de OL (Superpave)	$y=5E-16x^{-4,713}$	0,97	5,00E-16	-4,713

Figura 4.97: Gráfico dos modelos de fadiga em função da deformação resiliente específica.

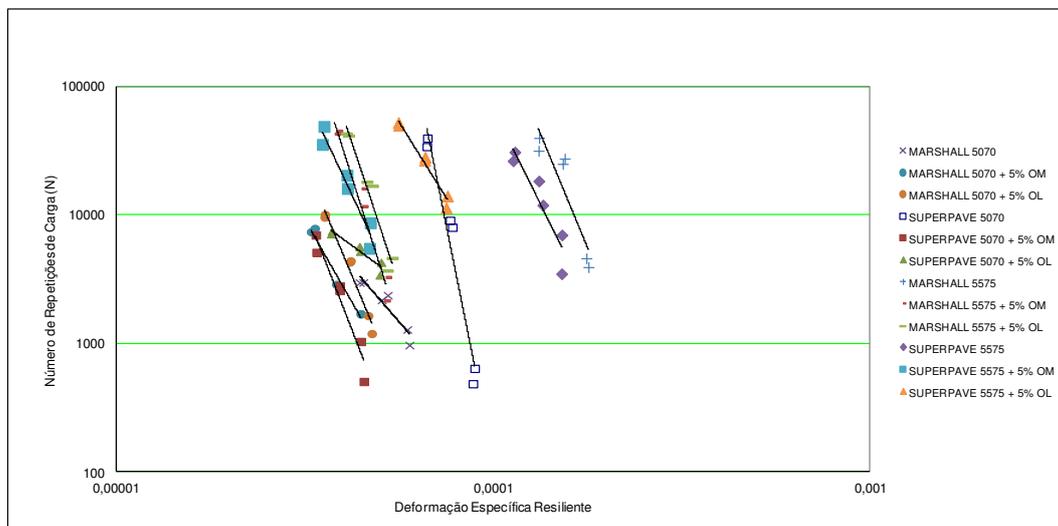


Tabela 4.58: Variação da vida de fadiga com o nível de tensão de tração aplicado.

Misturas Asfálticas	Modelo	R <sup>2</sup>	$\epsilon_i=2 \times 10^{-5}$ (cm/cm)	Ordem	$\epsilon_i=4 \times 10^{-5}$ (cm/cm)	Ordem	$\epsilon_i=6 \times 10^{-5}$ (cm/cm)	Ordem
CAP 50/70 (Marshall)	$y=5E-12x^{-3,395}$	0,89	4,49E+04	10	4,27E+03	10	1,08E+03	9
CAP 50/70 + 5% de OM (Marshall)	$y=8E-20x^{-5,121}$	0,96	9,49E+04	9	2,73E+03	11	3,42E+02	10
CAP 50/70 + 5% de OL (Marshall)	$y=8E-28x^{-7,00}$	0,97	6,25E+05	11	4,88E+03	9	2,86E+02	11
CAP 50/70 (Superpave)	$y=6E-57x^{-14,59}$	0,96	2,17E+12	1	8,79E+07	2	2,37E+05	4
CAP 50/70 + 5% de OM (Superpave)	$y=1E-30x^{-7,545}$	0,94	2,84E+05	8	1,52E+03	12	7,14E+01	12
CAP 50/70 + 5% de OL (Superpave)	$y=2E-06x^{-2,142}$	0,91	2,32E+04	12	5,27E+03	8	2,21E+03	6
CAP 55/75 (Marshall)	$y=1E-23x^{-7,09}$	0,84	2,07E+10	2	1,52E+08	1	8,57E+06	1
CAP 55/75 + 5% de OM (Marshall)	$y=8E-37x^{-9,233}$	0,96	1,94E+10	3	3,23E+07	3	7,65E+05	3
CAP 55/75 + 5% de OL (Marshall)	$y=1E-34x^{-8,781}$	0,95	1,83E+07	5	4,15E+04	6	1,18E+03	8
CAP 55/75 (Superpave)	$y=1E-19x^{-5,933}$	0,87	7,57E+08	4	1,24E+07	4	1,12E+06	2
CAP 55/75 + 5% de OM (Superpave)	$y=7E-24x^{-6,25}$	0,93	1,64E+06	7	2,15E+04	7	1,70E+03	7
CAP 55/75 + 5% de OL (Superpave)	$y=5E-16x^{-4,713}$	0,97	7,00E+06	6	2,67E+05	5	3,95E+04	5

#### 4.7.6 Resultado do Ensaio de Flow Number – FN

Na Tabela 4.59 e na Figura 4.98 constam os resultados obtidos dos parâmetros de FN, os quais foram realizados na temperatura de 60°C.

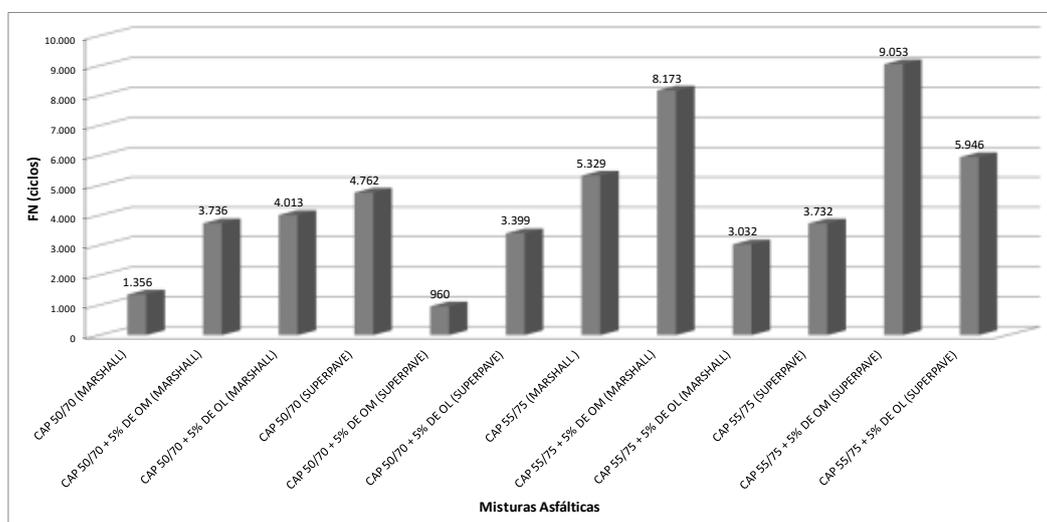
Observa-se que a adição dos óleos de Mamona e de Linhaça aumentou sobremaneira a resistência à deformação permanente avaliada por meio do Flow Number. Em destaque para a mistura de CAP 55/75 + 5% de OM (Superpave), que apresentou FN (9053), o qual representa um valor de 142,5% maior que a mistura sem adição. Seguida da mistura de CAP 55/75 + 5% de OM (Marshall), com FN igual a 8173 ciclos, o qual representa um valor de 53,4% maior que a mistura sem adição. Para adição de Linhaça o melhor resultado à deformação permanente foi obtido com a mistura CAP 55/75 + 5% DE OL (Superpave), que resultou em FN de 5946 ciclos, o qual representa um acréscimo de 59,3% em relação à mistura de CAP 55/75.

Tabela 4.59: Resultados de deformação permanente (Flow Number).

Flow Number (in/in)		
Misturas Asfálticas	FN (ciclos)	$\epsilon_p$ (FN) (microstrains)
CAP 50/70 (MARSHALL)	1356	8889
CAP 50/70 + 5% DE OM (MARSHALL)	3736	13952
CAP 50/70 + 5% DE OL (MARSHALL)	4013	8534
CAP 50/70 (SUPERPAVE)	4762	7727
CAP 50/70 + 5% DE OM (SUPERPAVE)	960	12569
CAP 50/70 + 5% DE OL (SUPERPAVE)	3399	9905
CAP 55/75 (MARSHALL )	5329	12146
CAP 55/75 + 5% DE OM (MARSHALL)	8173	7804
CAP 55/75 + 5% DE OL (MARSHALL)	3032	11540
CAP 55/75 (SUPERPAVE)	3732	7000
CAP 55/75 + 5% DE OM (SUPERPAVE)	9053	8281
CAP 55/75 + 5% DE OL (SUPERPAVE)	5946	7391

Os menores valores de FN foram verificados para as misturas de CAP 50/70 + 5% DE OM (Superpave), com FN igual a 960 ciclos; CAP 50/70 (Marshall), com FN igual a 1356; e CAP 55/75 + 5% DE OL (Marshall), com FN igual a 3032 ciclos. Os resultados de deformações permanentes, a partir do critério de Flow Number, confirmaram os resultados reológicos obtidos pelo MSCR, os quais apontaram uma elevada resistência à deformação permanente dos ligantes. Ainda, constata-se que os valores obtidos são significativamente superiores aos das misturas asfálticas com óleos vegetais estudadas por Leni et. al. (2012) e apresentados na Tabela 2.10.

Figura 4.98: Gráfico dos Resultados de deformação permanente (Flow Number).



## 4.8 Estimativa da Economia de Combustível e Aplicação da Mistura Asfáltica

### 4.8.1 Estimativa da Economia de Combustível

Neste item buscou-se estimar a economicidade proporcionada pela utilização das oleaginosas na produção de misturas asfálticas. Sendo assim, apresenta-se uma estimativa simples da economia de energia com a diminuição da secagem/vaporização d'água/aquecimento dos agregados para a produção das misturas mornas em usina, em comparação com misturas a quente, calculando-se ainda a economia de gastos com combustíveis. Neste trabalho, dá-se enfoque à secagem e ao aquecimento dos agregados em usina, pois esta é uma etapa que demanda grande consumo energético na produção de misturas asfálticas aquecidas (MOTTA, 2011).

O cálculo da demanda de energia foi realizado tal como indicado em Romier et. al. (2006) e Olard (2008) apud Motta (2011), a partir do estabelecimento de alguns parâmetros constantes na Tabela 4.60 utilizando as Equações de 4.1 a 4.4.

Tabela 4.60: Gráfico dos Resultados de deformação permanente (MOTTA, 2011).

Parâmetro	Valor
calor específico dos agregados ( $C_{agr}$ )	0,85 kJ/kg <sup>o</sup> C
calor específico da água ( $C_a$ )	4,2 J/kg <sup>o</sup> C
calor específico de vapor ( $C_v$ )	1,85 J/kg <sup>o</sup> C
calor latente de vaporização da água ( $Clv$ )	2250 kJ/kg <sup>o</sup> C
teor de umidade dos agregados ( $U_{agr}$ )	3%

- Energia para aquecimento dos agregados (em kJ):

$$EA_{agr} = C_{agr} \times m_{agr} \times (T_{agr} - T_{amb}) \quad (4.1)$$

- Energia para aquecimento da água (em kJ):

$$EA_{\acute{a}gua} = C_a \times \left( \frac{m_{agr}}{m_{agr} - \frac{U_{agr}}{100} \times m_{agr}} - 1 \right) \times m_{agr} \times (100 - T_{amb}) \quad (4.2)$$

- Energia para vaporização da água (em kJ):

$$EV_{\acute{a}gua} = clv \times \left( \frac{m_{agr}}{m_{agr} - \frac{U_{agr}}{100} \times m_{agr}} - 1 \right) \times m_{agr} \quad (4.3)$$

- Energia para aquecimento do vapor da água (em kJ):

$$EA_{\text{água}} = C_v \times \left( \frac{m_{\text{agr}}}{m_{\text{agr}} - \frac{U_{\text{agr}}}{100} \times m_{\text{agr}}} - 1 \right) \times m_{\text{agr}} \times (T_{\text{agr}} - 100) \quad (4.4)$$

Sendo:

$M_{\text{agr}}$  – massa dos agregados (t);

$T_{\text{agr}}$  – temperatura de aquecimento dos agregados (°C);

$T_{\text{amb}}$  – temperatura de aquecimento dos agregados (°C).

Para estimativa do consumo de energia foi considerada uma produção de 160 t de misturas asfálticas e que a quantidade de agregados secos correspondem a 95,3%, visto que o teor ótimo de CAP 50/70 foi de 4,7%. Para a mistura convencional de CAP 50/70 a temperatura adotada para a secagem/vaporização da água e aquecimento dos agregados foi de 172,5°C, para a mistura de CAP 50/70 + 5% de OM a temperatura adotada foi de 165,0°C e para o CAP 50/70 + 5% de OL a temperatura adotada foi de 161,0°C, conforme Tabela 9. A temperatura ambiente considerada foi de 25°C.

Logo, a energia gasta para secar/vaporizar a água e aquecer os agregados na mistura asfáltica é apresentada na Tabela 4.61

Tabela 4.61: Estimativa de energia necessária para secar/vaporizar a água e aquecer os agregados na usinagem de 160t.

Parâmetro	CAP 50/70	CAP 50/70 + 5% DE OM	CAP 50/70 + 5% DE OL
	Energia estimada (MJ)		
Aquecimento dos agregados	19197	18221	17701
Aquecimento da água	1492	1492	1492
Vaporização d'água	10655	10655	10655
Aquecimento do vapor	635	569	534
Total	31980	30938	30382
Redução de energia com os agregados em relação ao CAP 50/70 [%]	-	3,3	5,0

Para usinas que costumam utilizar o gás GLP na produção de misturas asfálticas convencionais, têm-se cerca de 5,8 kg de combustível por tonelada de mistura (MOTTA, 2011). Considerando uma redução de 3,3% para o CAP 50/70 + 5% de OM, o consumo passaria para 5,61 kg/t. Como o preço médio do GLP na Paraíba é de R\$ 54,24/13 kg (Tabela 4.62), a estimativa de gasto com combustível para produzir 160 t de mistura será de R\$3.871,90, enquanto que a mistura de CAP 50/70 + 5% de OM o valor é de R\$ 3.738,4, constituindo uma economia de aproximadamente R\$ 133,51. Expandindo para uma situação

para pavimentar 1 km de rodovia, com duas faixas de 3,6 m e com 10 cm de espessura de concreto asfáltico, considerando a massa específica aparente obtida na dosagem Marshall de 2,337 g/cm<sup>3</sup>, seriam necessárias 1.683 t. Por conseguinte, teríamos uma economicidade de aproximadamente R\$ 430/km.

Para a mistura contendo o óleo de Linhaça, considerando o mesmo raciocínio, teríamos uma economia de aproximadamente R\$ 200,27 para produzir 160 t de CAP 50/70 + 5% de OL. Ao estendermos para situação de 1 km de rodovia, a economia passaria para R\$ 643,36 para produzir 1.683 t.

Faz-se importante considerar, conforme destacou Motta (2011), que os valores calculados são produtos das hipóteses adotadas e são variáveis em função de fatores como, por exemplo, temperatura ambiente, temperatura dos agregados e teor de umidade dos materiais pétreos.

Tabela 4.62: Preços de GLP na Paraíba (Fonte: <http://www.anp.gov.br> - acesso em 18.12.2015).

Município	Nº DE POSTOS PT 100000000	Preço ao Consumidor					Preço Distribuidora				
		PREÇO GROSSO	DESCONTO FISCAL	PREÇO LÍQUIDO	PREÇO LÍQUIDO COM IPI	PREÇO LÍQUIDO COM IPI E ICMS	PREÇO GROSSO	DESCONTO FISCAL	PREÇO LÍQUIDO	PREÇO LÍQUIDO COM IPI	
Recife	3	47,00	2,74	44,26	44,26	44,26	44,26	2,74	41,52	41,52	
Caruaru	6	54,37	2,04	52,33	52,33	52,33	52,33	2,04	50,29	50,29	
Cajazeiras	33	44,37	2,54	41,83	41,83	41,83	41,83	2,54	39,29	39,29	
João Pessoa	24	42,77	2,87	39,90	39,90	39,90	39,90	2,87	37,03	37,03	
Patos	6	41,25	2,85	38,40	38,40	38,40	38,40	2,85	35,55	35,55	
Santa Rita	6	47,17	3,89	43,28	43,28	43,28	43,28	3,89	39,39	39,39	
Sumé	3	43,35	1,53	41,82	41,82	41,82	41,82	1,53	40,29	40,29	

## 5. CONCLUSÕES

Foram observados os comportamentos reológicos dos CAPs convencional (CAP 50/70) e modificado (CAP 55/75) considerando percentuais de 4%, 5% e 6% de óleo, bem como as propriedades mecânicas das misturas asfálticas com os procedimentos de dosagem Marshall e Superpave. A redução nas temperaturas de usinagem e compactação - TUC proporcionaram, por consequência, uma diminuição no consumo de combustível na usinagem, de fumos e as emissões de poluentes.

O comportamento reológico dos CAPs com a adição do óleo de Linhaça apresentou valores melhores do que aqueles obtidos com a adição do óleo de Mamona, de acordo com os resultados referentes aos ensaios de penetração, de ponto de amolecimento, de viscosidade rotacional e de reologia (MSCR) quando as mostras foram submetidas ao envelhecimento a curto prazo (RTFO).

Para as misturas asfálticas estudadas foram obtidas uma melhor adesividade e coesão, com conseqüente maior resistência à ação deletéria da água. Os corpos de provas foram submetidos ao ensaio de dano por umidade induzida (Lottman) e ao ensaio de desgaste cântabro. Os resultados encontrados foram significativamente superiores aos das misturas com CAPs na condição natural.

Podemos inferir que as oleaginosas, na proporção estudada de 5%, podem ser utilizadas como aditivos a fim de melhorar as propriedades reológicas dos Cimentos Asfálticos, convencional e modificado, com significativa diminuição do poder oxidativo inerente ao aumento de temperatura durante a usinagem. Portanto, os resultados indicam melhoria das propriedades mecânicas das misturas asfálticas com a utilização destes aditivos, podendo potencializar a vida útil das misturas asfálticas convencionais.

## 6. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Estudos de Propriedades Reológicas de CAPs Modificados com aditivos pesquisados, nas proporções encontradas, a partir de amostras submetidas ao envelhecimento a longo prazo;
- Estudos de Propriedades Reológicas de CAPs com maiores consistências, CAP 30/45, CAP 15/25 e com asfalto borracha, nas proporções encontradas, a partir de amostras submetidas ao envelhecimento a curto e longo prazo;
- Estudo para utilização dos óleos de Mamona e de Linhaça na reciclagem de pavimentos a frio;
- Estudos de Dosagens Marshall e Superpave a partir de parâmetros como: Módulo de Resiliência; Flow Number, Módulo Dinâmico e Vida de Fadiga;

- Estudo e execução de um trecho experimental utilizando o CAP puro e modificado com adição dos óleos de Mamona e de Linhaça a partir de dosagens Marshall e Superpave;
- Determinação dos constituintes químicos do cimento asfáltico puro e modificado com adição dos óleos de Mamona e de Linhaça por meio do ensaio SARA.

## REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 12891 (1993) Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro – RJ.
- ABNT NBR 15166 (2007) Asfalto Modificado – Ensaio de separação de fase, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP.
- ABNT NBR 15184 (2004) Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP.
- ABNT NBR 15235 (2009) Materiais Betuminosos – Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP.
- AIREY, G. (2003). Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified roadbitumens. *Fuel*, 82(14), pp. 1709-1719.
- ALENCAR, E. V. D. (2009) Avaliação do uso de polímero EVA, resíduo da indústria de calçados (EVAR) e aditivos no desempenho reológico de ligante asfáltico de petróleo. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza/CE.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO M320 (2010) Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. Washington, D.C.
- ANDERSON, M. et al. (2010) MSCR: a better tool for characterizing high temperature performance properties. *Asphalt*; 25(2): 15-16.18.21-3.
- ANDERSON, D.A. et al. (1991) Physical properties of asphalt cement and the development of performance related specifications. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, White Bear Lake, v.60, p.437-456.
- ANDERSON, D.A.; KENNEDY, T.W. (1993) Development of SHRP binder specification. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, White Bear Lake, v.62, p.481-507.
- ANITELLI, A. (2013). Estudo do dano por umidade de misturas densas com ligantes asfálticos convencional e modificado com polímero SBS dissertação. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo/SP.
- ARAUJO, M. F. A. (2007) Efeito da radiação solar no envelhecimento do concreto betuminoso usinado a quente. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Belo Horizonte/BH.

ASPHALT INSTITUTE (2004). Manual de Asfalto, USA.

Asphalt Institute. (2010). Implementation of the multiple stress creep recovery test and specification. Asphalt Institute Technical Advisory Committee in cooperation with Federal Highway Administration.

ASPHALT INSTITUTE. SUPERPAVETM (1994) Performance Graded Asphalt: Binder Specification and Testing. SUPERPAVETM Series N°1 (SP-1). Lexington.

ASTM D6373 – 15 (2008) Specification for Performance Graded Asphalt Binder. American Society for Testing and Materials.

ASTM D7175 – 08 (2005) Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. American Society for Testing and Materials.

ASTM D7405 – 10a (2008) Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. American Society for Testing and Materials.

AZEVEDO, D.M.P. de; LIMA, E.F. (2001). *O agronegócio da mamona no Brasil*. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia.

BABADOPULOS, Lucas (2008) Estudo laboratorial da viabilidade do uso de fibras Sintéticas em misturas do tipo SMA, 156 reunião de pavimentação urbana. Salvador/BA

BAHIA, H. U. et al. (2001) Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design, NCHRP Report 459. Washington D.C.: National Cooperative Highway Research

BARNES, H., HUTTON, J., & WALTERS, K. (1993). An Introduction of Rheology. Elsevier.

BARTHEL, W.; MARCHAND, J.-P.; von DEVIVERE, M (2004). Warm asphalt mixes by adding a synthetic zeolite. In: EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS, 3., Vienna. Anais..., n. 354.

BECHARA, M. F.; FAXINA, A. L.; FABBRI, G. T. P.; LEITE, L. M.; SOARES, J. B.; SOARES, S. A. Avaliação dos efeitos do envelhecimentos a curto e a longo prazos por meio das curvas-mestre. In: ENCONTRO DE ASFALTOS, 19., 2008, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, 2008. p. 25-32

BELL, C.A., WIEDER, A.J. & FELLIN, M.J., 1994, Laboratory Aging of Asphalt-aggregate Mixtures: Field Validation. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington-DC.

BELTRÃO, N. E. de M.; Informações sobre o Biodiesel, em especial feito com o óleo de mamona. Campina Grande: EMBRAPA-CNPA, Dezembro 2003, 3p. (Comunicado Técnico 177).

BERNUCCI, L. B., MOTTA, R. MOURA, E. (2010) Misturas asfálticas para revestimentos de pavimentos produzidas com baixa energia e redução de temperatura, para diminuição de consumo energético e de emissão de poluentes - RT-360/10.12.

BIOMERCADO (2016). Centro de referência da cadeia de produção de biocombustíveis para a agricultura familiar. Disponível em: <http://www.biomercado.com.br/> acesso em 22.01.2016).

BRASIL, MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E COMERCIO, SECRETARIA TECNOLOGIA INDUSTRIAL (1995) Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais, SECRETARIA TECNOLOGIA INDUSTRIAL Série Documentos, 346p. No. 16, 1985.

BRINGEL, R. M. (2007) Estudo químico e reológico de ligantes asfálticos modificados por polímeros e aditivos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza/CE.

BUDNY, J. (2012) Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Mornas, Dissertação de Mestrado, 155p, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.

CASTRO, L. N. Reciclagem a Frio "In Situ" com Espuma de Asfalto (2003). Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

CAVALCANTI, L. S. (2010) Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas. Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/ UFRJ. Rio de Janeiro/RJ.

CAVALCANTI, L. S.; MOTTA, L. M. G.; ODA, S. (2010) Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas tipo warm-mix com uso de aditivo surfactante. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 2010, Rio de Janeiro. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis.

CENTRO BRASILEIRO DE REFERÊNCIA EM BIOCOMBUSTÍVEIS – CERBIO (2006) O biodiesel, Publicação da Divisão de Biocombustíveis – DBIO, Ano II, Ed. 12.

CERATTI, J. A. P.; NÚÑEZ, W. P.; ROHDE, L.; SOUZA, D.C., Projeto de Pesquisa Concepa-Lapav, Estudo laboratorial de redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas, Porto Alegre, 2007.

CHAVES, J. M., BERNUCCI, L. L., VASCONCELOS, K., LEANDRO, R. P., LOPES, M. M., MOURA, E., GASPARI, M., PRIORI, C. D., ALVES, D., SILVA, A. H. M., HIGO, F. (2014) Avaliação de métodos de dosagem de misturas asfálticas e sua relação com as Propriedades mecânicas. Autopista Litoral Sul/Arteris.

CHOWDHURY, A.; BUTTON, J.W. (2008) A Review of Warm Mix Asphalt, Texas A&M University System, EUA.

CHURCH, A. H.; (1892). The Chemistry of Paints and Paintings. Nature (London, U. K.), v. 45, n. 1159, p. 241 – 245.

CNT (2012) Pesquisa CNT de rodovias 2012: Relatório Gerencial – Brasília: CNT: SET: SENAT. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/>>. Acesso em: 3.02.2016, 18:55:13.

CNT (2014) Pesquisa CNT de rodovias 2014: Relatório Gerencial – Brasília: CNT: SET: SENAT. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/>>. Acesso em: 5.02.2016, 15:45:13.

CNT (2015) Pesquisa CNT de rodovias 2015: Relatório Gerencial – Brasília: CNT: SET: SENAT. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/>>. Acesso em: 5.02.2016, 16:40:40.

CORBETT, δ. W. (1969) Analytical Chemistry. 41, p.576-579.

COSTA, T. L. (2006) Características físicas e físicoquímicas do óleo de duas cultivares de mamona. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande/PB.

D'Ángelo (2010). The multiple stress creep recovery (MSCR) procedure. Technical Brief. Office of Pavement Technology. Federal Highway Administration, United States Department of Transportation. FHWA-HIF-10-XXX.

D'ANGELO, J. et al. (2007). Revision of the Superpave high-temperature binder specification: the multiple stress creep recovery test. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. White Bear Lake, v. 76, p. 123-162.

DELGADILLO, R. et al. (2006). Nonlinearity of repeated creep and recovery binder test and relationship with mixture permanent deformation. Transportation Research Record. Washington, n. 1962, p. 3-11.

DNIT (1998) Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos. Rio de Janeiro

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 035/1998 Agregados – determinação da Abrasão “los Angeles”, Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 130/2010  
Determinação da Recuperação elástica dos materiais asfálticos pelo ductilômetro Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 155/2010 Material  
Asfáltico – Determinação da penetração, Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 043/1995  
Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall, Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 054/1997  
Equivalente de areia, Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 078/1998  
Agregadado graúdo – adesividade a ligante betuminoso, Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 081/1998  
Agregadado – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo, Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 083/1998  
Agregado – análise granulométrica, Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 084/1995  
Agregado graúdo – determinação da densidade real, Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 086/1994  
Agregado – determinação do índice de forma, Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 089/1994  
Agregados – Avaliação da Durabilidade pelo Emprego de Soluções de Sulfato de Sódio ou Magnésio –  
determinação do índice de forma, Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 383/1999  
Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cantabro, Rio de Janeiro,  
1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 155/2010  
Agregados – Material Asfáltico – Determinação de penetração – Método de ensaio, Rio de Janeiro,  
2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 095/2006  
Cimento asfáltico de petróleo – Especificação de material, Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 131/2010  
Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT – ME 385/1999  
Pavimentação – Concreto asfáltico com asfalto polímero, Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT – ME 136/2010  
Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à Tração por compressão diametral – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT – ME 181/1998  
Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo, Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT – ME 129/2011 Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico – Especificação de material, Rio de Janeiro, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT – ME 134/2010  
Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT – ME 131/2006  
Pavimentação flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de Serviços, Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT – ME 383/1999 Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cantabro, Rio de Janeiro, 1999.

DOMINGOS, M. D. I. (2011) Caracterização do comportamento fluência e recuperação de ligantes asfálticos modificados virgens e envelhecidos. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.

ESTEVES, R. AL., PEREIRA, R. G. (2015) Análise sobre a Evolução do Biodiesel no Brasil.

FARIAS, M. F. (2006) Avaliação do comportamento termoanalítico e oxidativo do biodiesel de mamona. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte/RN.

FAXINA, L. (2006). Estudo da viabilidade técnica do uso do óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha. Universidade de São Paulo/USP.

FERNANDES, M. R. S. (2009) Efeitos de aditivo tipo óleo e enxofre na reologia de asfaltos modificados com SBS. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade federal do Rio Grande do Sul / UFRGS / Porto Alegre.

FERNANDES, P. R. N. Caracterização de ligante asfáltico brasileiro e avaliação da presença de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs). Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal do Ceará-UFC, Fortaleza-CE, 2007.

FHWA (2008) Warm-mix asphalt: European practice. Virginia: FHWA, 2008. (Report FHWA-PL-08-007).

FONSECA, M. M., YOSHIDA, M. I. (2009) Análise térmica do óleo de linhaça natural e oxidado Thermal analysis of raw and aged linseed oil. Revista Vértices periódica técnico-científica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense (IFF), Campos dos Goytacazes/RJ.

FREEDMAN, B. E; BAGBY, M. O. Heat of Combustion of Fatty Esters and Triglycerides. Journal American Oil Chemists Society, 1601-1605, 1989.

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

FURLAN, A. P. (2006) Considerações acerca da adesão e da suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas densas à luz de algumas propriedades mecânicas. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

FURLAN, A. P.; SANTOS, C. R. G.; GIGANTE, A. C.; FABBRI, G. T. P (2004). Algumas considerações acerca de ensaios para avaliação do dano por umidade em mistura asfáltica densa. 35ª RAPv, Reunião Anual De Pavimentação, Rio de Janeiro.

GAESTEL, C. et al. (1971) Contribution à la Connaissance des Propriétés des Bitumes Routiers. Bull Laboratoire des Ponts e Chaussés., v. 466, p.85-97.

GALVÃO, E. L.; SILVA, D. C. F.; SILVA, J. O.; MOREIRA, A. V. B.; SOUSA, E. M. B. D. (2008) Avaliação do Potencial Antioxidante e Extração Subcrítica do Óleo de Linhaça. Ciência e Tecnologia de Alimentos. v. 28. n. 3, p. 551 – 557.

GALVÃO, P. F. C. (2007). Avaliação termoanalítica da Eficiência de antioxidantes na Estabilidade oxidativa do Biodiesel de mamona. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte / UFRN/RN.

GLITA S. (1998). Contribution à l'étude physico-chimie des bitumes. Havre. Thèse (Doctorat en Sciences) – Faculté des Sciences et Techniques de l'Université du Havre.

HEMPEL, C. G. Filosofia da ciencia natural.: Zahar, Rio de Janeiro, 1981.

HERRINGTON, P.R. e BALL, G.F.A. 1996. Temperature Dependence of Asphalt Oxidation Mechanism. Fuel. 1996, Vol. 75, pp. 1129-1131.

HOUSSAIN, Z. ZAMAN, M. GHOSH, D. (2015) Creep compliance and percent recovery of oklahoma certified binder using the multiple stress recovery (MSCR) method. Oklahoma Department of Transportation. É UM ARTIGO DE REVISTA?

JIA, X., HUANG, B., Bowers, F. B., Zhao, S. (2013) Infrared spectra and rheological properties of asphalt cement containing waste engine oil residues. Construction and Building Materials

JUNOR TADEU, C. (2008). Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Convencionais e Modificadas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia/UFRGS.

JURAS, I. A. G. M. (2013) Mudança do clima: Principais conclusões do 5º Relatório do IPCC.

KENNEDY, W. T., HUBER, G., HARRIGAN, E. T., COMINSKY, R. J. HUGHES, C. S. QUINTUS, H. V. MOULTHOP, J. S. (1994) Superior performance asphalt pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research program – SHRP - A - 140.

KNOTHE, G.; GERPEN, J. V.; KRAHL, J.; RAMOS, L.P. (2006) Manual do Biodiesel. Traduzido do original "The Biodiesel Handbook" por Luiz Pereira Ramos, São Paulo: Edgard Blucher.

KRISTJÁNSDÓTTIR, Ó.; MUENCH, S.T.; MICHAL, L. (2007) BLURKE, G., Assessing Potential for Warm-Mix Asphalt Technology Adoption. Transportation Research Record, No.2040. TRB.

LARRY JUNIOR, I. (2014) Avaliação de misturas mornas com emprego de simulador de tráfego linear Larry Rivoire Junior. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do sul – UFRGS, Porto Alegre/RS.

LEITE, L. F. M., NASCIMENTO, L. A. H. CRAVO, M. C. C., MARTINS, A. T. (2012) The use of vegetal products as asphalt cement modifier. 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress. Istanbul.

LEITE, L. M., ODA, S., NASCIMENTO, L. H., CHACUR, M. E MOTTA L. G. (2010) Estudo do Envelhecimento do Cimento Asfáltico de Petróleo Efeito dos Parâmetros de Dosagem da Mistura Asfáltica In: XXIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte-XXIV ANPET, Salvador.

LEITE. (1999). Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio – COPPR/UFRJ.

LENI, L. F. M., CHACUR, M. NASCIMENTO, L. A. H., CRAVO, M. C., MARTINS, A. T. (2012) The use of vegetal products as asphalt cement modifier. 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 13-15th June 2012, Istanbul.

LESUEUR, D. (2009) The Colloidal Structure of Bitumen: Consequences on the Rheology and on the Mechanisms of Bitumen Modification.

LEUSEUR, D.; GERARD, J. F.; CLAUDY, P.; LÉTOFFÉ, J. M.; PLANCHE, J. P.; MARTIN, D. A (1996) Structure-related model to describe asphalt linear viscoelasticity. *Journal of Rheology*, v. 40, p. 813-836.

LIMA, A.D.; SILVA, A.M.O.; TRINDADE, R.A.; TORRES, R.P.; FILHO, J.M. (2007) Composição Química e Compostos Bioativos Presentes na Polpa e na Amêndoa do Pequi. *Rev. Bras. Frutic. Jaboticabal – SP*. V.29, n.3, p. 695-698.

LIMA, C. S. (2008) Caracterização de ligantes asfálticos modificados com borracha de pneu e aditivo. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará/Fortaleza.

LIMA, S. G.; FEITOSA, C. M.; CITO, A. M. G. L.; MOITA, J. M.; LOPES, J. A. D.; LEITE, A. S.; BRITO, M. C. DANTAS, S. M. M.; MELO, C. A. A. C. (2008) Effects of immature cashew nut-shell liquid (*Anacardium occidentale*) against oxidative damage in *Saccharomyces cerevisiae* and inhibition of acetylcholinesterase activity. *Genetics and Molecular Research*, v. 7, p.806-818

LUCENA, M. C. C. (2005) Caracterização química e reológica de asfaltos modificados por polímeros. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza/CE.

MEILUNAS, R. J.; BETSEN, J. G.; STEINBERG, (1990) A. Analysis of aged paint binders by FTIR spectroscopy. *Studies in Conservation*, v. 35, p. 33-51.

MELLO, D. (2012) Avaliação da adição de Evotherm no comportamento de misturas asfálticas em laboratório e no desempenho em campo. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis/SC.

MELLO, S. M. (2014) Avaliação das propriedades reológica e mecânica de ligantes e misturas asfálticas irradiadas. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ.

MELO, A. M. F. (2010) Avaliação das Propriedades de Óleos Vegetais visando a Produção de Biodiesel. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba/PB.

MERIGHI, C. F. (2015) Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo/USP - SP.

MIRZA, M.W., WITCZAK, M.W. (1995) Development of a Global Aging System for Short and Long Term Aging of Asphalt Cements. Association of Asphalt Paving Technologists–AAPT, v 74, pp 393-430, 1995.

MORILHA, A. J. (2004) Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC.

MOTHÉ, M. G. (2009). Estudo do comportamento de ligantes asfálticos por reologia e análise térmica. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro Escola de Química/UFRJ – RJ.

MOTTA, L., Tonial, I., Leite, L., & Constantino, R. (1996). Princípios do projeto e análise superpave de misturas asfálticas. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo.

MOTTA, R. S. (2011) Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo/USP, São Paulo/SP.

MULLER, H.G. (1978) Introduccion a la reologia de los alimentos. Editora Acribia, Zaragoza.

NCHRP REPORT 691 (2011), Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt, EUA.

NELSON FILHO, W. (2013) Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas. Universidade Federal do Ceará- UFS, Fortaleza/CE.

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

OLARD, F. Low energy asphalts. Routes Roads, n. 336-337, p. 131-145, 2008.

OLIVEIRA, A. K. C.; SILVA, L. H . N.; SILVA, L. L . N.; RODRIGUES, K. R.; SILVA, S. I. F.; COSTA, A. C. J. (2012) Produção e avaliação comparativa do biodiesel de soja e biodiesel de linhaça através de dois métodos de preparação aplicados aos óleos vegetais. VII CONNEPI. Congresso Norte Nordeste de pesquisa e inovação. Palmas/ Tocantins.

OSAKI & BATALHA (2008) Produção de biodiesel e óleo vegetal no Brasil: realidade e desafio. SOBER – XLVI Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural.

OTTO, G. G. (2009) Misturas asfálticas mornas: Verificação da fadiga e do módulo complexo. 179 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis.

PAMPLONA, T. F. (2013) Efeito da adição de ácido polifosfórico em ligantes asfálticos de diferentes fontes. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo/USP, São Paulo/SP.

PARENTE, E. J. de S. (2003) Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado. Fortaleza: Tecbio.

PENZ, G. (2010) propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas com adição de zeólitas sintetizadas. Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre/RS.

PARENTE, E.J. de S.; SANTOS JUNIOR, J.N.; BASTOS, J.A.; PARENTE JUNIOR.,E.J. de S. (2003) Biodiesel: Uma aventura tecnológica num país engraçado. Fortaleza: Tecbio, 66p.

PÉREZ, Y. A. G. (2013). Avaliação do desempenho mecânico e reológico de misturas asfálticas mornas. Tese de Soutorado. Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina /UFSC – SC.

PETERSEN, J. C., BRANTHAVER, J. F., ROBERTSON, R. E., HARNSBERGER, P., DUVALLE, J., ENSLEY, E. K. (1993) Effects of physicochemical factors on asphalt oxidation kinetics. Transportation Research Record.

Petersen, J. C.; Branthaver, J. F.; Robertson, R. E.; Harnsberger, P.; Duvalle, J.; E. K. Effects of Physicochemical Factors on Asphalt Oxidation Kinetics (1993). Transportation Research Record, vol. 1391, p. 1-10.

PFEIFFER, J. P.; SAAL, R. N. J. (1940) Asphaltic bitumen as colloid systems. Journal of Physical Chemistry, v. 44, p.139–49.

PFEIFFER, J. P.; SAAL, R. N. J. (1940). Asphaltic bitumen as colloid systems. Journal of Physical Chemistry, v. 44, p.139–49.

PIZZORNO, B. S. (2010) Efeito do solvente e da temperatura na morfologia superficial do cimento asfáltico de petróleo. Dissertação de Mestrado. Universidade federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ

PLATER, M. J.; SILVA, B. D.; GELBRICH, T.; HURSTHOUSE, M. B.; HIGGITT, C. L.; SAUNDERS, D. R. (2003) The Characterisation of Lead Fatty Acid Soaps in ‘Protrusions’ in Aged Traditional Oil Paint. Polyhedron, v. 22, n. 24, p. 3171 – 3179.

- POLACCO, G.; STATNA, J.; BIONDI, D.; ZANZOTTO, L. (2006) Relation between polymer architecture and nonlinear viscoelastic behavior of modified asphalts. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, v. 11, p. 230-245.
- PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C. (2007) *Warm-mix asphalt: Best Practices. Quality Improvement Series 125*. Lanham: NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, EUA.
- RAKI, L.; MASSON, J. F.; COLLINS, P. Rapid bulk fractionation of maltenes into saturates, aromatics, and resins by flash chromatography. *Energy & Fuels*, v.14, p. 160-163, 2000.
- REDA, S. Y.; CARNEIRO, P. I. B. (2007) Óleos e Gorduras: Aplicações e Implicações. *Revista Analytica*, n. 27. p. 60 – 67.
- ROBERTS, F. L.; et al. *Hot mix asphalt materials, mixture design and construction*. 2nd ed. Lanham, Maryland, USA. NAPA Research and Education Foundation, National Center for Asphalt Technology – NCAT, 1996, 585 p.
- ROBERTS, F. L.; MOHAMMAD, L. N.; WANG, L. B. History of Hot Mix Asphalt Mixture Design in the United States. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 4, p. 279 - 293, 2002.
- ROBERTS, F.L.; LYTTON, R.L. (1987). *FAA mixture design procedure for asphalt-rubber concrete*.
- RODRIGUES, J. K. (1998) *Pressiômetros, tensões e deformações em sub-bases de pavimentos flexíveis*. Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes. Universidade de São Paulo – USP/SP.
- RUAN Y.; DAVISON, R. R.; GLOVER, C. J. (2003) Oxidation and viscosity hardening of polymermodified asphalts. *Energy & Fuels*, v. 17, p. 991-998.
- RUDIO, Franz Victor. *Introdução ao projeto de pesquisa científica*. 25. ed. Petropolis: Vozes, 1999.
- SANTOS, C. R. G (2005) *Avaliação das influências do tipo de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos/USP.
- SANTOS, K. P. (2012) *Estudo da incorporação de argilas montmorilonitas como modificador em cimentos asfálticos de petróleo*. Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande/PB.
- SAVY FILHO, A.; BANZATTO, N.V.; BARBOZA, M.Z. (1999) Mamoneira. In: CATI (Campinas, SP). *Oleaginosas no Estado de São Paulo: análise e diagnóstico*. Campinas, p.29.

SHULGA, O. et al. (2012) Application of Polyphosphoric Acid for HMA Modification. US and European Experience. 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Istanbul, June 13 – 15th.

SILVA, H. M. R. D. (2005 b) Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique. Contribuição Para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia civil, Universidade do Ninho, Portugal.

SILVA, J. A. A. (2015). Utilização do politereftalato de etileno (PET) em misturas asfálticas. Tese de Doutorado. Engenharia de Processos. Universidade Federal de Campina Grande/UFCG – PB.

SILVA, L. S. (2005 a) Contribuição ao Estudo do Envelhecimento de Ligantes Asfálticos. Influência da Adição de Polímeros e Comportamento Frente a Radiação UV. Tese Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre/RG.

SILVA, L. S. (2005) Contribuição ao Estudo do Envelhecimento de Ligantes Asfálticos. Influência da Adição de Polímeros e Comportamento Frente a Radiação UV. Tese Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre/RG.

SILVEIRA, I. V. S. (2014) Propriedades reológicas sob altas temperaturas de ligantes asfálticos modificados com óleo da moringa. 43ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação e 17º ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária.

SOARES, J. B. (2014). Notas de aulas da pós-graduação. Universidade Federal do Ceará/UFC. Fortaleza/CE.

SOBREIRO, F. P. (2014) Efeito da adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com copolímero SBS. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo/USP, São Paulo/SP.

SOLAIMANIAN, M.; Kennedy, T. W. (2000) - Precision of the Moisture Susceptibility Test – Method Tex 531-C. Research Report 4909-IF. Center for Transportation Research, University of Texas at Austin.

SOUZA, L. J. S. (2012) Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado com Óleo de Mamona. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande/PB.

TERREL, R. L.; AL-SWAILMI, S. (1994) Water Sensitivity of Asphalt-Aggregate Mixes: Test Selection. SHRP-A-403. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, DC.

Tia, M., et al. 1994. Improved Asphalt Cement Specifications to Ensure Better Performance. [ed.] Dept. of Civil Engineering. Gainesville : University of Florida, 1994.

VASCONCELOS, K. L. (2004). Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pelas metodologias Marshall e Superpave com diferentes granulometrias. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará/CE.

VIEIRA, R. de M.; LIMA, E. F, Importância sócio econômica e melhoramento de plantas para o Nordeste brasileiro, Disponível em: <http://www.cpatsa.embrapa.br/catalogo/livrorg/mamona.pdf>, Acesso em: 12/07/2005.

WALL, A. V. (2012) Warm Mix Asphalt in a Critical Perspective, 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Istanbul, Turquia.

WAYNICK, J.A. Characterization of Biodiesel Oxidation and Oxidation Products. 2005.

WEISS, E. A. (1983) Oil seed crops. London: Longman, 659p.

WEISS, E. A. Oil seed crops. London: Longman, 659p. 1983.

WHITEOAK, D. 2003. Shell Bitumen Handbook. London : Thomas Telford, Ltd, 2003.

WHITEOAK, D., 1990, SHELL Bitumen Handbook. SHELL, Inglaterra.

WHITEOAK, D., 1991, The SHELL Bitumen Handbook. 1 ed. reprinted - Inglaterra, SHELL.

YEN T F, EDERMAN J G, POLLACK S S. (1961). Investigation of the structure of petroleum asphaltenes by X-ray diffraction. Analytical Chemistry, v.33, p.1587-1594.

ZEGARRA, J. R. E. (2007) Avaliação de misturas produzidas com ligantes asfálticos peruanos convencional PEN 60/70 e modificados por polímero SBS tipo I 60/60 e PG 76 -22. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo/USP, São Paulo/SP.

**ANEXO I – ENSAIO COM O REÔMETRO DE CISALHAMENTO DINÂMICO - DSR**

## Antes do envelhecimento a custo prazo com auxílio do procedimento RFTO

### DSR Report

#### SAMPLE INFORMATION

Sample Name: PG CAP 50/70  
 Operator: DENNYELE  
 Project:  
 Notes: PG 50/70  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOG\Fabiano\PG\PG CAP 50 70.tri  
 Time and Date: 5/7/2015 12:37:23 PM

#### DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
 Model:  
 Bearing Type:  
 Temperature Control:  
 Test: Original Binder  
 Geometry Diameter: 25.0 mm  
 Gap: 1000 µm

Warning: The test was run with out of date or missing calibrations

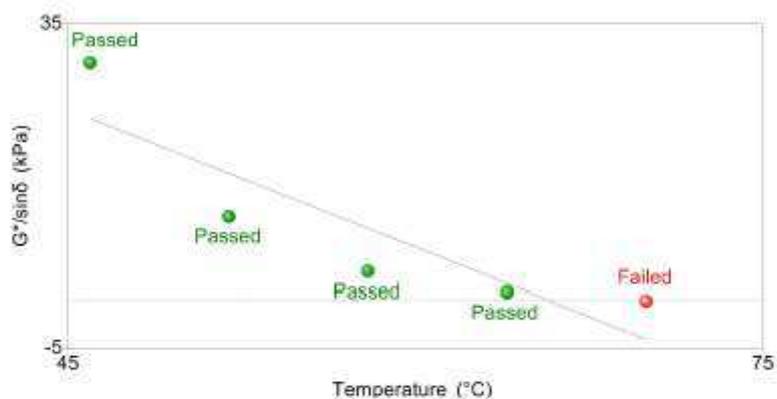
#### RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G <sup>2</sup> /sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	3.66	12.2	84.4	30.1	30.2	Pass
2	10.0	52.0	1.33	12.0	86.2	11.1	11.1	Pass
3	10.0	58.0	0.62	12.0	87.6	4.36	4.36	Pass
4	10.0	64.0	0.22	12.0	88.5	1.85	1.85	Pass
5	10.0	70.0	0.10	12.0	89.2	0.844	0.844	Fail

DSR Report, continued

#### FAIL GRAPH

Sample Name: PG CAP 50/70  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOG\Fabiano\PG\PG CAP 50 70.tri  
 Fail Temperature: 65.7 °C



# DSR Report

**SAMPLE INFORMATION**

Sample Name: PG CAP 50/70 + 4% OM  
 Operator: DENNYELE  
 Project:  
 Notes: PG 50/70 + 4% oleo de mamona  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\PG CAP 50 70 + 4% OM.tri  
 Time and Date: 5/8/2015 3:24:52 PM

**DSR/TEST SPECIFICATIONS**

Manufacturer: TA Instruments  
 Model:  
 Bearing Type:  
 Temperature Control:  
 Test: Original Binder  
 Geometry Diameter: 25.0 mm  
 Gap: 1000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

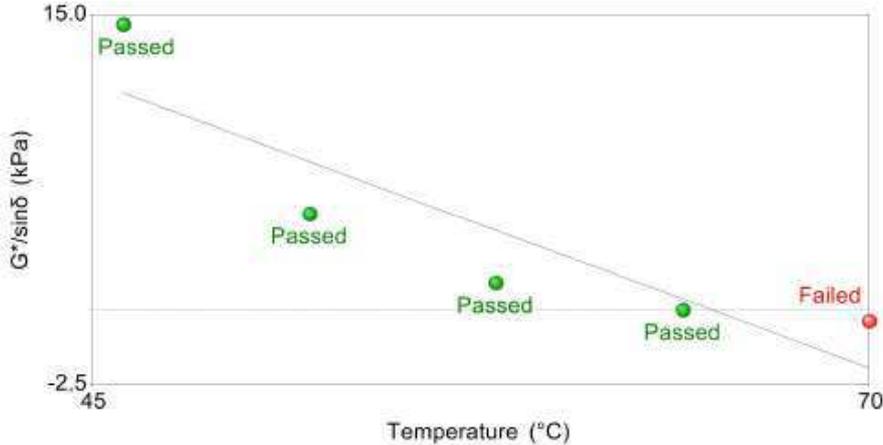
**RESULTS**

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G'/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	1.74	12.0	86.1	14.5	14.5	Pass
2	10.0	52.0	0.67	12.0	87.4	5.56	5.57	Pass
3	10.0	58.0	0.27	12.0	88.4	2.28	2.28	Pass
4	10.0	64.0	0.12	12.0	89.1	1.01	1.01	Pass
5	10.0	70.0	0.06	12.0	89.4	0.485	0.485	Fail

DSR Report, continued

**FAIL GRAPH**

Sample Name: PG CAP 50/70 + 4% OM  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\PG CAP 50 70 + 4% OM.tri  
 Fail Temperature: 64.9 °C



pg cap 50 70 + 5% om  
Time sweep - 1

46 °C		A	B	C	D	E	F	G
		$G'$ Pa	$G''$ Pa	$\tan(\delta)$	$\omega$ rad/s	$\bar{\eta}$ $\mu\text{N.m}$	$t_s$ s	$T$ °C
1	9%	577.802	9599.67	16.6141	10.0000	3552.87	36.3637	45.992

pg cap 50 70 + 5% om  
Time sweep - 2

52 °C		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
		$G'$ Pa	$G''$ Pa	$\tan(\delta)$	$\omega$ rad/s	$\bar{\eta}$ $\mu\text{N.m}$	$t_s$ s	$T$ °C	Raw phase °	$\bar{\nu}$ rad	$G''/\sin(\delta)$ kPa
1	9%	138.64	3614.4	26.070	10.000	1332.0	36.270	51.999	88.7836	9.60831e-	3.61977

pg cap 50 70 + 5% om  
Time sweep - 3

58 °C		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
		$G'$ Pa	$G''$ Pa	$\tan(\delta)$	$\omega$ rad/s	$\bar{\eta}$ $\mu\text{N.m}$	$t_s$ s	$T$ °C	Raw phase °	$\bar{\nu}$ rad	$G''/\sin(\delta)$ kPa
1	9%	33.515	1467.8	43.796	10.000	539.86	24.148	57.998	91.1407	9.58890e-	1.46861

pg cap 50 70 + 5% om  
Time sweep - 4

64 °C		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
		$G'$ Pa	$G''$ Pa	$\tan(\delta)$	$\omega$ rad/s	$\bar{\eta}$ $\mu\text{N.m}$	$t_s$ s	$T$ °C	Raw phase °	$\bar{\nu}$ rad	$G''/\sin(\delta)$ kPa
1	9%	8.4228	647.41	76.864	10.000	238.99	24.226	63.999	94.8078	9.59252e-	0.64752

Obs.: Não foi possível salvar o arquivo referente a esse percentual originário do programa do DSR.

# DSR Report

## SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 50/70 + 6% OM  
Operator: DENNYELE  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 570 + 6% OM.tri  
Time and Date: 5/27/2015 4:55:39 PM

## DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: Original Binder  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu$ m

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

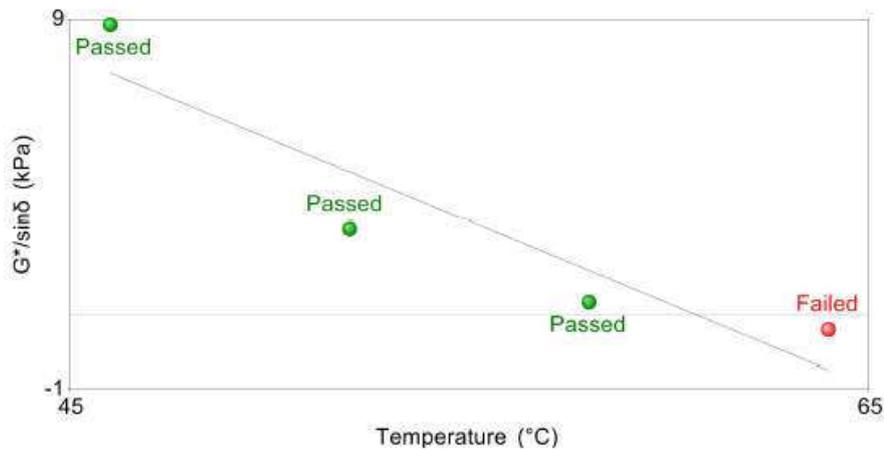
## RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. $^{\circ}$ C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G* kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	1.06	12.0	86.7	8.85	8.86	Pass
2	10.0	52.0	0.40	12.0	87.9	3.32	3.32	Pass
3	10.0	58.0	0.16	12.0	88.8	1.34	1.34	Pass
4	10.0	64.0	0.07	12.0	89.3	0.593	0.593	Fail

DSR Report, continued

## FAIL GRAPH

Sample Name: CAP 50/70 + 6% OM  
File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 570 + 6% OM.tri  
Fail Temperature: 60.7  $^{\circ}$ C



# DSR Report

## SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 50/70 + 4% OL

Operator: DANIEL

Project:

Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5070 + 4% OL.tri

Time and Date: 8/10/2015 12:36:02 PM

## DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments

Model:

Bearing Type:

Temperature Control:

Test: Original Binder

Geometry Diameter: 25.0 mm

Gap: 1000  $\mu$ m

Warning: The test was run with out of date or missing calibrations

## RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. $^{\circ}$ C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G''/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	1.18	12.0	88.3	9.67	9.69	Pass
2	10.0	52.0	0.46	12.0	87.6	3.85	3.86	Pass
3	10.0	58.0	0.20	12.1	88.5	1.65	1.65	Pass
4	10.0	64.0	0.09	12.0	89.2	0.760	0.760	Fail

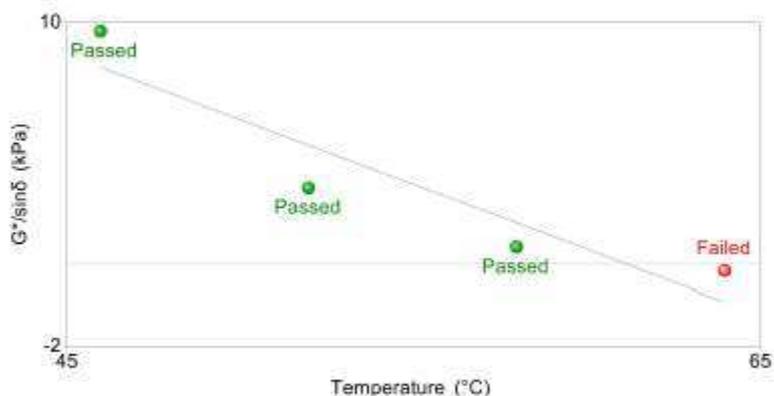
DSR Report, continued

## FAIL GRAPH

Sample Name: CAP 50/70 + 4% OL

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5070 + 4% OL.tri

Fail Temperature: 61.2  $^{\circ}$ C



# DSR Report

## SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 50/70 + 5% OL  
Operator: DANIEL  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5070 + 5% OL.tri  
Time and Date: 6/10/2015 2:35:50 PM

## DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: Original Binder  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu$ m

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

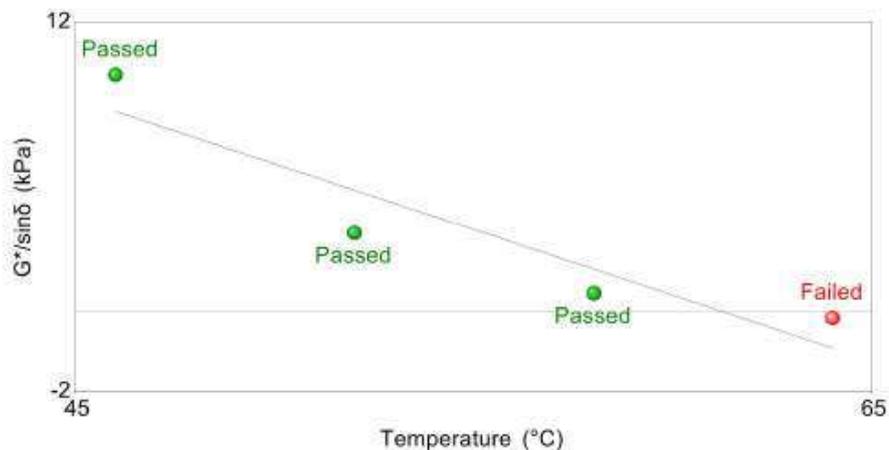
## RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. $^{\circ}$ C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G* kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	1.20	12.0	86.0	9.98	10.0	Pass
2	10.0	52.0	0.48	12.1	87.2	4.00	4.00	Pass
3	10.0	58.0	0.21	12.1	88.1	1.72	1.72	Pass
4	10.0	64.0	0.10	12.0	88.7	0.794	0.794	Fail

DSR Report, continued

## FAIL GRAPH

Sample Name: CAP 50/70 + 5% OL  
File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5070 + 5% OL.tri  
Fail Temperature: 61.3  $^{\circ}$ C



# DSR Report

## SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 50/70 + 6% OL  
Operator: DANIEL  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5070 + 6% OL.tri  
Time and Date: 6/10/2015 5:12:22 PM

## DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: Original Binder  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu\text{m}$

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

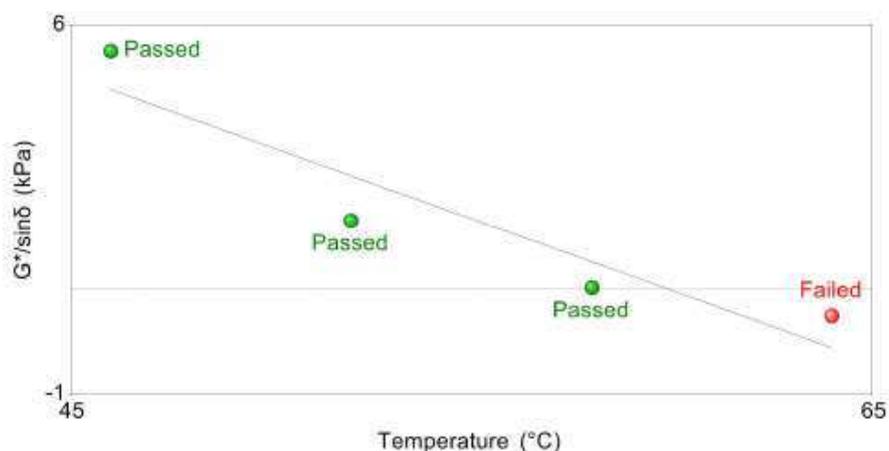
## RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. $^{\circ}\text{C}$	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	0.66	12.0	87.1	5.49	5.50	Pass
2	10.0	52.0	0.28	12.1	88.2	2.29	2.29	Pass
3	10.0	58.0	0.12	12.0	89.0	1.01	1.01	Pass
4	10.0	64.0	0.06	12.0	89.4	0.483	0.483	Fail

DSR Report, continued

## FAIL GRAPH

Sample Name: CAP 50/70 + 6% OL  
File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5070 + 6% OL.tri  
Fail Temperature: 59.9  $^{\circ}\text{C}$



### SAMPLE INFORMATION

Sample Name: PG CAP 55/75  
Operator: DENNYELE  
Project:  
Notes: PG 55/75

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\PG CAP 55 75.tri  
Time and Date: 5/8/2015 12:53:36 PM

### DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: Original Binder  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu\text{m}$

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

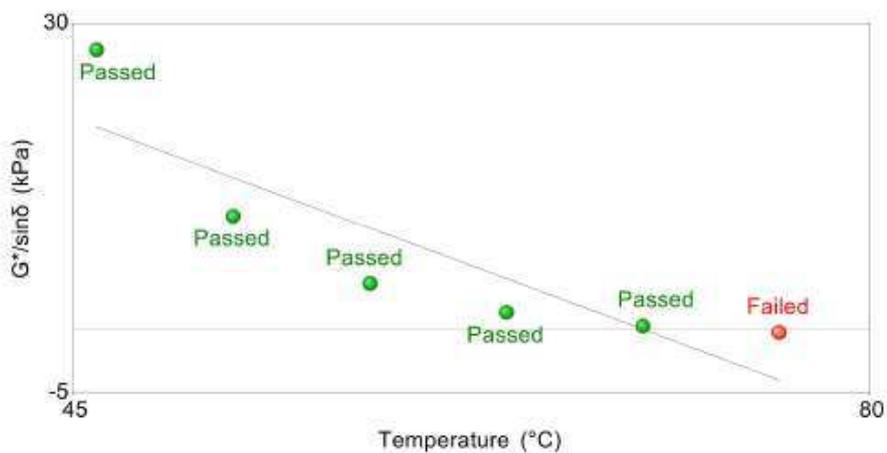
### RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. $^{\circ}\text{C}$	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G''/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	3.21	12.0	75.9	26.7	27.5	Pass
2	10.0	52.0	1.37	12.0	75.5	11.4	11.8	Pass
3	10.0	58.0	0.62	12.0	75.5	5.18	5.35	Pass
4	10.0	64.0	0.30	12.0	76.1	2.52	2.60	Pass
5	10.0	70.0	0.15	12.0	77.3	1.29	1.32	Pass
6	10.0	76.0	0.08	12.0	78.8	0.692	0.706	Fail

DSR Report, continued

### FAIL GRAPH

Sample Name: PG CAP 55/75  
File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\PG CAP 55 75.tri  
Fail Temperature: 70.0  $^{\circ}\text{C}$



# DSR Report

## SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 55/75 + 4% OM  
 Operator: DENNYELE  
 Project:  
 Notes:  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5575 + 4% OM.tri  
 Time and Date: 6/3/2015 5:52:50 PM

## DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
 Model:  
 Bearing Type:  
 Temperature Control:  
 Test: Original Binder  
 Geometry Diameter: 25.0 mm  
 Gap: 1000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

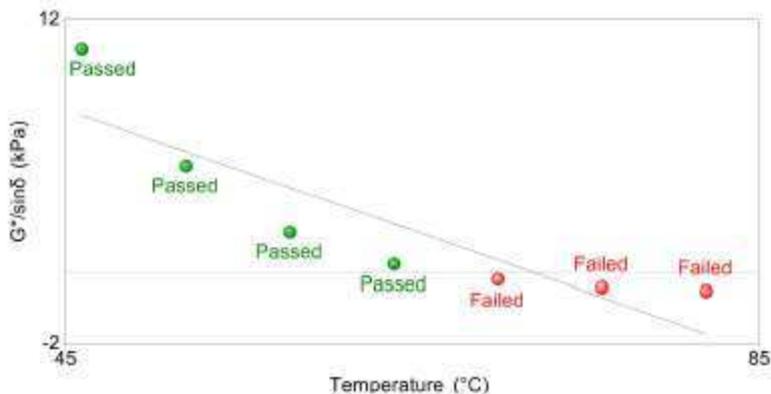
## RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	1.25	12.0	76.0	10.4	10.7	Pass
2	10.0	52.0	0.66	12.0	75.8	5.47	5.64	Pass
3	10.0	58.0	0.32	12.1	76.1	2.69	2.77	Pass
4	10.0	64.0	0.16	12.0	77.1	1.36	1.40	Pass
5	10.0	70.0	0.09	12.0	78.6	0.722	0.736	Fail
6	10.0	76.0	0.05	12.0	80.2	0.403	0.409	Fail
7	10.0	82.0	0.03	12.0	81.7	0.235	0.238	Fail

DSR Report, continued

## FAIL GRAPH

Sample Name: CAP 55/75 + 4% OM  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5575 + 4% OM.tri  
 Fail Temperature: 72.1 °C



# DSR Report

**SAMPLE INFORMATION**

Sample Name: CAP 55/75 + 5% OM  
 Operator: DANIEL  
 Project:  
 Notes:  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5575 + 5% OM.tri  
 Time and Date: 8/5/2015 1:31:56 PM

**DSR/TEST SPECIFICATIONS**

Manufacturer: TA Instruments  
 Model:  
 Bearing Type:  
 Temperature Control:  
 Test: Original Binder  
 Geometry Diameter: 25.0 mm  
 Gap: 1000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

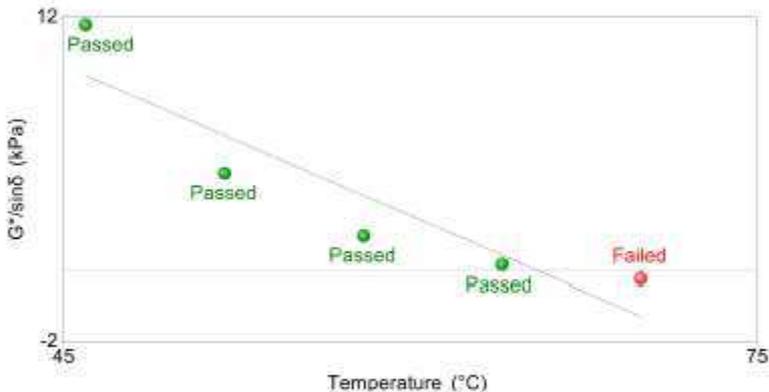
**RESULTS**

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G''/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	1.36	12.0	76.1	11.3	11.7	Pass
2	10.0	52.0	0.61	12.0	76.0	5.08	5.23	Pass
3	10.0	58.0	0.29	11.9	76.4	2.46	2.52	Pass
4	10.0	64.0	0.15	12.0	77.4	1.25	1.28	Pass
5	10.0	70.0	0.08	12.0	78.9	0.667	0.690	Fail

DSR Report, continued

**FAIL GRAPH**

Sample Name: CAP 55/75 + 5% OM  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5575 + 5% OM.tri  
 Fail Temperature: 65.6 °C



# DSR Report

### SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 55/75 + 6% OM  
 Operator: DANIEL  
 Project:  
 Notes:  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5575 + 6% OM.tri  
 Time and Date: 6/5/2015 4:05:30 PM

### DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
 Model:  
 Bearing Type:  
 Temperature Control:  
 Test: Original Binder  
 Geometry Diameter: 25.0 mm  
 Gap: 1000 µm  
 Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

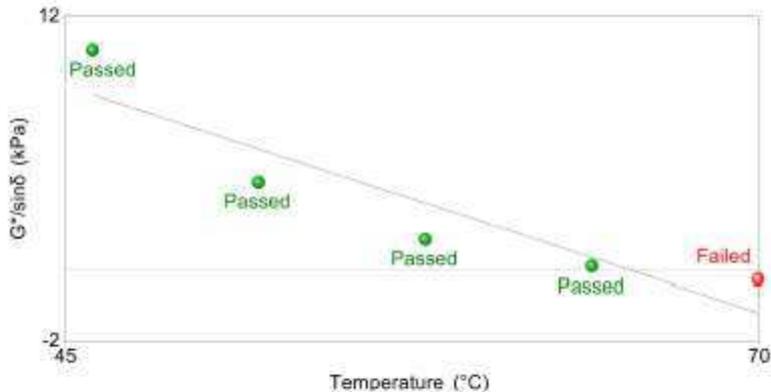
### RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G''/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	1.23	12.0	76.1	10.2	10.5	Pass
2	10.0	52.0	0.56	12.0	76.0	4.69	4.83	Pass
3	10.0	58.0	0.27	12.0	76.5	2.29	2.35	Pass
4	10.0	64.0	0.14	12.0	77.6	1.17	1.19	Pass
5	10.0	70.0	0.07	12.0	79.2	0.621	0.633	Fail

DSR Report, continued

### FAIL GRAPH

Sample Name: CAP 55/75 + 6% OM  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5575 + 6% OM.tri  
 Fail Temperature: 65.4 °C



# DSR Report

**SAMPLE INFORMATION**

Sample Name: CAP 55/75 + 4% OL  
 Operator: DANIEL  
 Project:  
 Notes:  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5575 + 4% OL.tri  
 Time and Date: 8/11/2015 10:01:47 AM

**DSR/TEST SPECIFICATIONS**

Manufacturer: TA Instruments  
 Model:  
 Bearing Type:  
 Temperature Control:  
 Test: Original Binder  
 Geometry Diameter: 25.0 mm  
 Gap: 1000 µm  
 Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

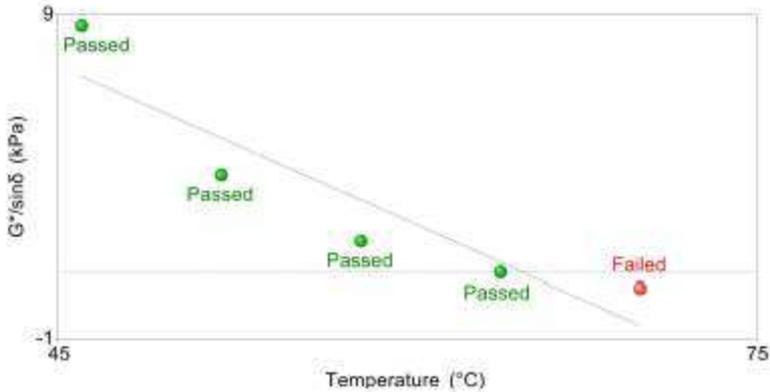
**RESULTS**

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G''/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	1.01	12.0	75.8	8.40	8.87	Pass
2	10.0	52.0	0.47	12.1	75.8	3.91	4.04	Pass
3	10.0	58.0	0.23	12.0	76.5	1.93	1.99	Pass
4	10.0	64.0	0.12	12.0	77.7	1.01	1.03	Pass
5	10.0	70.0	0.07	12.0	79.3	0.546	0.555	Fail

DSR Report, continued

**FAIL GRAPH**

Sample Name: CAP 55/75 + 4% OL  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5575 + 4% OL.tri  
 Fail Temperature: 65.0 °C



# DSR Report

## SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 55/75 + 5% OL  
Operator: DANIEL  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5575 + 5% OL.tri  
Time and Date: 6/11/2015 12:43:51 PM

## DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: Original Binder  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu$ m

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

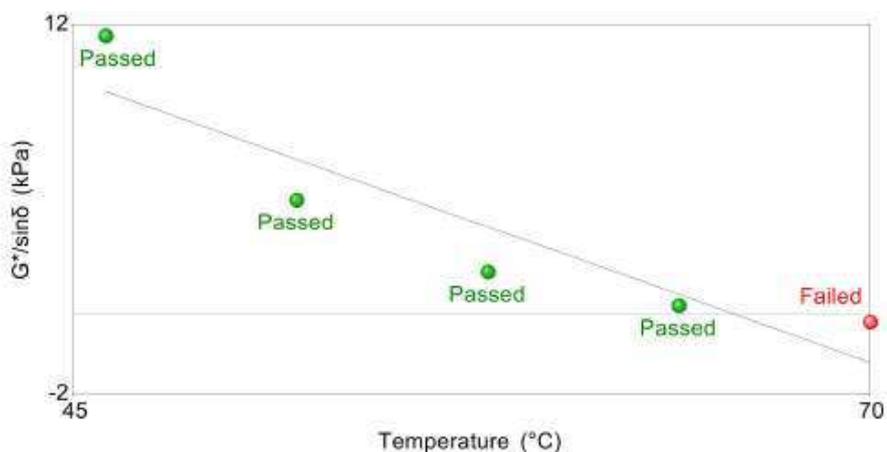
## RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. $^{\circ}$ C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G'/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	1.34	12.0	75.1	11.2	11.6	Pass
2	10.0	52.0	0.62	12.0	75.1	5.19	5.36	Pass
3	10.0	58.0	0.30	12.0	75.7	2.54	2.62	Pass
4	10.0	64.0	0.16	12.0	76.8	1.31	1.34	Pass
5	10.0	70.0	0.08	12.0	78.4	0.707	0.722	Fail

DSR Report, continued

## FAIL GRAPH

Sample Name: CAP 55/75 + 5% OL  
File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5575 + 5% OL.tri  
Fail Temperature: 65.8  $^{\circ}$ C



# DSR Report

## SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 55/75 + 6% OL  
Operator: DANIEL  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5575 + 6% OL.tri  
Time and Date: 6/12/2015 2:30:44 PM

## DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: Original Binder  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu\text{m}$

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

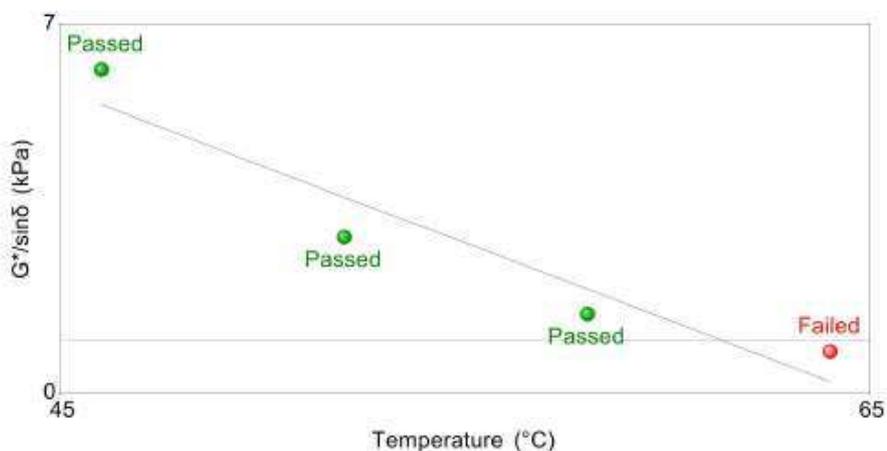
## RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. $^{\circ}\text{C}$	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G''/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	0.71	12.0	75.8	5.95	6.14	Pass
2	10.0	52.0	0.34	12.0	76.2	2.87	2.96	Pass
3	10.0	58.0	0.18	12.0	77.1	1.46	1.49	Pass
4	10.0	64.0	0.09	12.0	78.5	0.768	0.784	Fail

DSR Report, continued

## FAIL GRAPH

Sample Name: CAP 55/75 + 6% OL  
File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5575 + 6% OL.tri  
Fail Temperature: 61.3  $^{\circ}\text{C}$



# Após o envelhecimento a custo prazo com auxílio do procedimento RTFO

## DSR Report

### SAMPLE INFORMATION

Sample Name: PG RTFOT 5070  
Operator: DANIEL  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG RTFOT\CAP 5070.tri  
Time and Date: 8/15/2015 6:42:40 PM

### DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: RTFO Residue  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu$ m

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

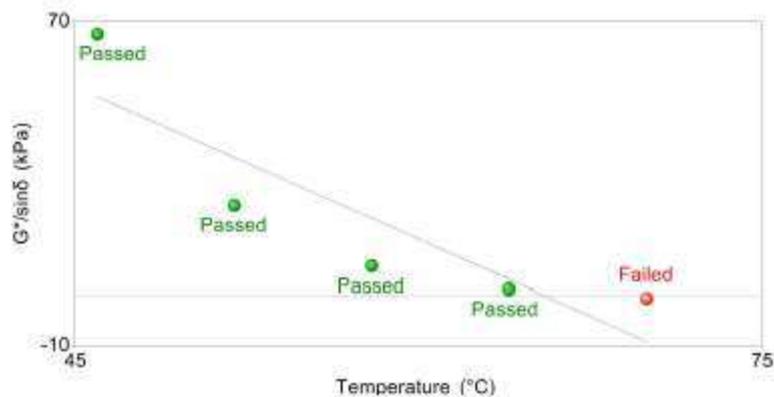
### RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. $^{\circ}$ C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G''/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	6.61	10.0	80.3	66.0	66.9	Pass
2	10.0	52.0	2.40	9.9	83.0	24.2	24.4	Pass
3	10.0	58.0	0.94	10.0	85.2	9.43	9.46	Pass
4	10.0	64.0	0.39	10.0	86.6	3.89	3.90	Pass
5	10.0	70.0	0.17	10.1	88.0	1.71	1.71	Fail

DSR Report, continued

### FAIL GRAPH

Sample Name: PG RTFOT 5070  
File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG RTFOT\CAP 5070.tri  
Fail Temperature: 65.6  $^{\circ}$ C



# DSR Report

## SAMPLE INFORMATION

Sample Name: PG RTFOT 50/70 + 4% OM  
 Operator: DANIEL  
 Project:  
 Notes:  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG RTFOT\PG RTFOT CAP 50 70 + 4% OM.tr  
 Time and Date: 6/18/2015 5:20:50 PM

## DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
 Model:  
 Bearing Type:  
 Temperature Control:  
 Test: RTFO Residue  
 Geometry Diameter: 25.0 mm  
 Gap: 1000  $\mu$ m

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

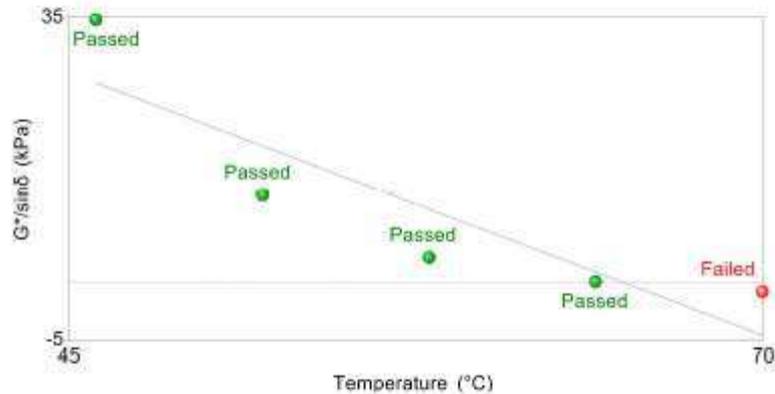
## RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G''/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	3.44	10.0	82.0	34.4	34.7	Pass
2	10.0	52.0	1.30	10.0	84.4	13.0	13.0	Pass
3	10.0	58.0	0.52	10.0	86.2	5.23	5.24	Pass
4	10.0	64.0	0.23	10.0	87.6	2.25	2.25	Pass
5	10.0	70.0	0.10	10.0	88.6	1.01	1.01	Fail

DSR Report, continued

## FAIL GRAPH

Sample Name: PG RTFOT 50/70 + 4% OM  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG RTFOT\PG RTFOT CAP 50 70 + 4% OM.tr  
 Fail Temperature: 64.9 °C



# DSR Report

**SAMPLE INFORMATION**

Sample Name: PG RTFOT 50/70 + 5% OM  
 Operator: DANIEL  
 Project:  
 Notes:  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG RTFOT\PG RTFOT CAP 50 70 + 5% OM .tri  
 Time and Date: 6/19/2015 12:41:39 PM

**DSR/TEST SPECIFICATIONS**

Manufacturer: TA Instruments  
 Model:  
 Bearing Type:  
 Temperature Control:  
 Test: RTFO Residue  
 Geometry Diameter: 25.0 mm  
 Gap: 1000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

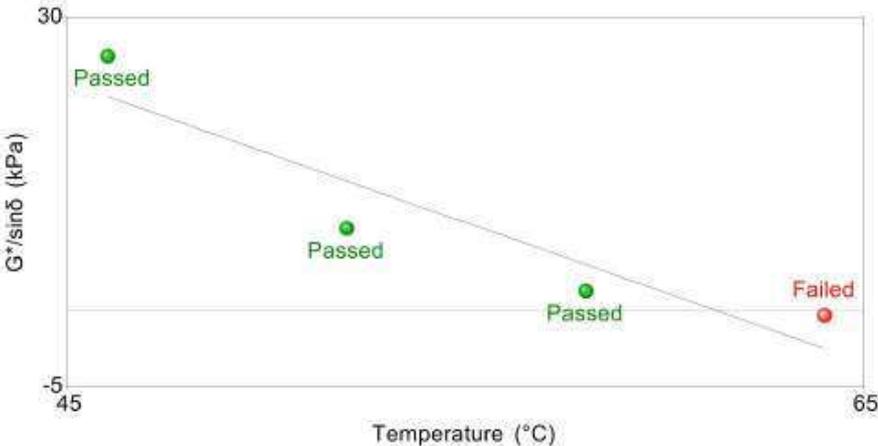
**RESULTS**

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G* kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	2.59	9.9	82.7	26.1	26.3	Pass
2	10.0	52.0	0.99	10.0	84.9	9.93	9.97	Pass
3	10.0	58.0	0.40	9.9	86.6	4.03	4.04	Pass
4	10.0	64.0	0.17	10.1	87.9	1.73	1.74	Fail

DSR Report, continued

**FAIL GRAPH**

Sample Name: PG RTFOT 50/70 + 5% OM  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG RTFOT\PG RTFOT CAP 50 70 + 5% OM .tri  
 Fail Temperature: 61.3 °C



# DSR Report

## SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 55/75 + 6% OM  
Operator: DANIEL  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5575 + 6% OM.tri  
Time and Date: 6/5/2015 4:05:30 PM

## DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: Original Binder  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu$ m

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

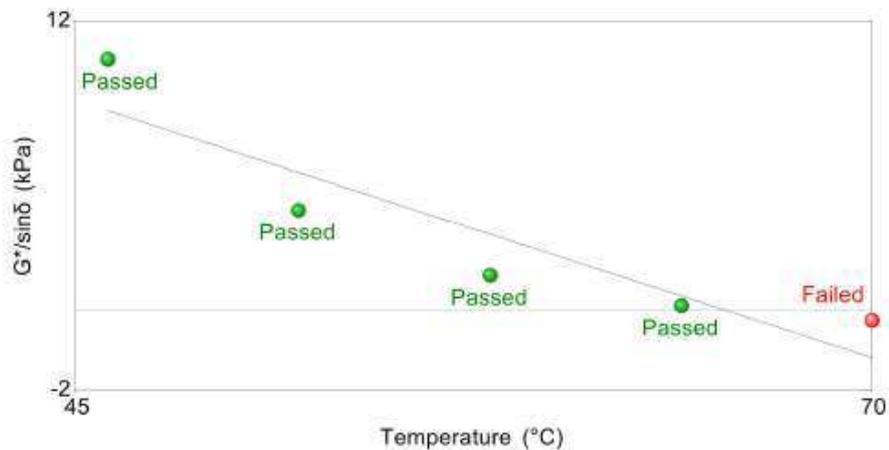
## RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. $^{\circ}$ C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G <sup>*</sup> /sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	1.23	12.0	76.1	10.2	10.5	Pass
2	10.0	52.0	0.56	12.0	76.0	4.69	4.63	Pass
3	10.0	58.0	0.27	12.0	76.5	2.29	2.35	Pass
4	10.0	64.0	0.14	12.0	77.6	1.17	1.19	Pass
5	10.0	70.0	0.07	12.0	79.2	0.621	0.633	Fail

DSR Report, continued

## FAIL GRAPH

Sample Name: CAP 55/75 + 6% OM  
File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5575 + 6% OM.tri  
Fail Temperature: 65.4  $^{\circ}$ C



# DSR Report

## SAMPLE INFORMATION

Sample Name: PG RTFOT 50/70 + 4% OL  
Operator: DANIEL  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG RTFOT\PG RTFOT CAP 50 70 + 4% OL.tri

Time and Date: 6/29/2015 12:11:28 PM

## DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: RTFO Residue  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu$ m

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

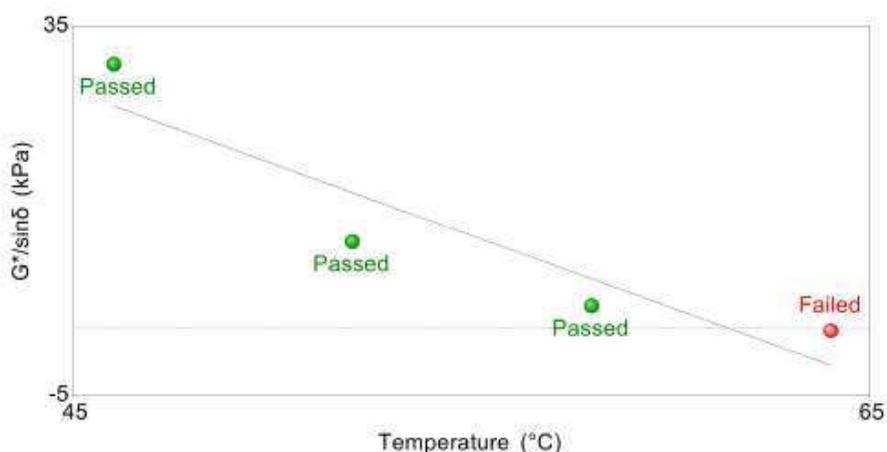
## RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G''/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	3.04	9.9	82.3	30.6	30.9	Pass
2	10.0	52.0	1.16	10.0	84.6	11.6	11.6	Pass
3	10.0	58.0	0.46	9.9	86.4	4.64	4.65	Pass
4	10.0	64.0	0.20	10.1	87.7	1.97	1.97	Fail

DSR Report, continued

## FAIL GRAPH

Sample Name: PG RTFOT 50/70 + 4% OL  
File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG RTFOT\PG RTFOT CAP 50 70 + 4% OL.tri  
Fail Temperature: 61.5 °C



# DSR Report

**SAMPLE INFORMATION**

Sample Name: PG RTFOT 50/70 + 5% OL  
 Operator: DANIEL  
 Project:  
 Notes:  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG RTFOT\PG RTFOT CAP 50 70 + 5% OL .tn  
 Time and Date: 6/29/2015 2:03:23 PM

**DSR/TEST SPECIFICATIONS**

Manufacturer: TA Instruments  
 Model:  
 Bearing Type:  
 Temperature Control:  
 Test: RTFO Residue  
 Geometry Diameter: 25.0 mm  
 Gap: 1000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

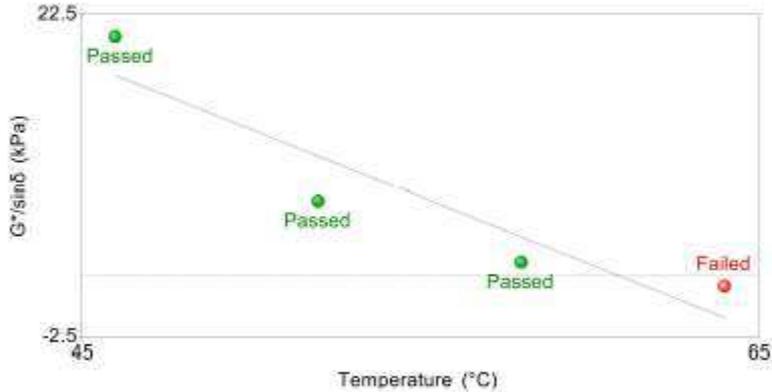
**RESULTS**

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G''/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	2.07	10.0	83.9	20.7	20.8	Pass
2	10.0	52.0	0.80	10.0	85.8	8.01	8.03	Pass
3	10.0	58.0	0.33	10.0	87.3	3.29	3.30	Pass
4	10.0	64.0	0.14	10.0	88.4	1.44	1.44	Fail

DSR Report, continued

**FAIL GRAPH**

Sample Name: PG RTFOT 50/70 + 5% OL  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG RTFOT\PG RTFOT CAP 50 70 + 5% OL .tn  
 Fail Temperature: 60.9 °C



# DSR Report

**SAMPLE INFORMATION**

Sample Name: PG RTFOT 50/70 + 6% OL  
 Operator: DANIEL  
 Project:  
 Notes:  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG RTFOT\PG RTFOT CAP 50 70 + 6% OL.tri  
 Time and Date: 6/29/2015 4:25:11 PM

**DSR/TEST SPECIFICATIONS**

Manufacturer: TA Instruments  
 Model:  
 Bearing Type:  
 Temperature Control:  
 Test: RTFO Residue  
 Geometry Diameter: 25.0 mm  
 Gap: 1000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

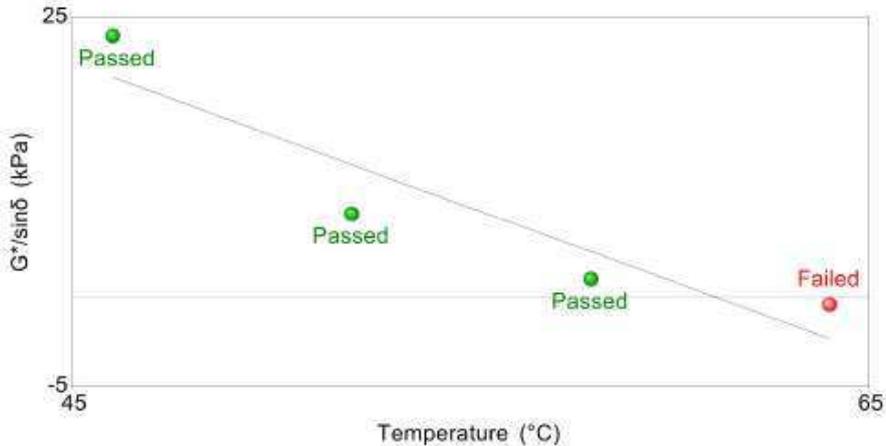
**RESULTS**

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G'/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	2.30	9.9	82.8	23.3	23.5	Pass
2	10.0	52.0	0.90	10.0	85.0	8.99	9.02	Pass
3	10.0	58.0	0.37	10.0	86.7	3.69	3.69	Pass
4	10.0	64.0	0.16	10.1	87.9	1.60	1.60	Fail

DSR Report, continued

**FAIL GRAPH**

Sample Name: PG RTFOT 50/70 + 6% OL  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG RTFOT\PG RTFOT CAP 50 70 + 6% OL.tri  
 Fail Temperature: 61.1 °C



# DSR Report

## SAMPLE INFORMATION

Sample Name: PG RTFOT 55/75  
 Operator: DANIEL  
 Project:  
 Notes:  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG RTFOT\CAP 5575.tri  
 Time and Date: 8/16/2015 3:15:28 PM

## DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
 Model:  
 Bearing Type:  
 Temperature Control:  
 Test: RTFO Residue  
 Geometry Diameter: 25.0 mm  
 Gap: 1000  $\mu$ m  
 Warning: The test was run with out of date or missing calibrations

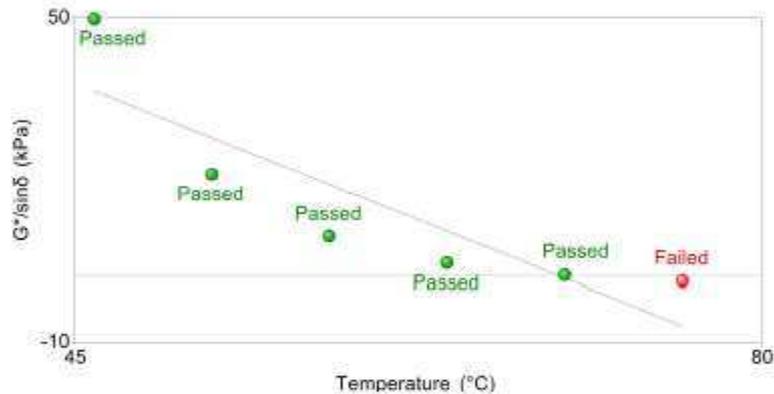
## RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. $^{\circ}$ C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G'/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	4.75	9.9	73.1	47.7	49.9	Pass
2	10.0	52.0	2.00	10.0	73.0	20.1	21.0	Pass
3	10.0	58.0	0.91	10.0	73.0	9.04	9.46	Pass
4	10.0	64.0	0.43	10.0	73.3	4.35	4.54	Pass
5	10.0	70.0	0.22	9.9	74.2	2.21	2.30	Pass
6	10.0	76.0	0.12	10.0	75.6	1.19	1.23	Fail

DSR Report, continued

## FAIL GRAPH

Sample Name: PG RTFOT 55/75  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG RTFOT\CAP 5575.tri  
 Fail Temperature: 69.6  $^{\circ}$ C



Sample Name: PG RTFOT 55/75 + 4% OM  
 Operator: DANIEL  
 Project:  
 Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG RTFOT\PG RTFOT CAP 55 75 + 4% OM .tri  
 Time and Date: 6/19/2015 5:26:38 PM

**DSR/TEST SPECIFICATIONS**

Manufacturer: TA Instruments  
 Model:  
 Bearing Type:  
 Temperature Control:  
 Test: RTFO Residue  
 Geometry Diameter: 25.0 mm  
 Gap: 1000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

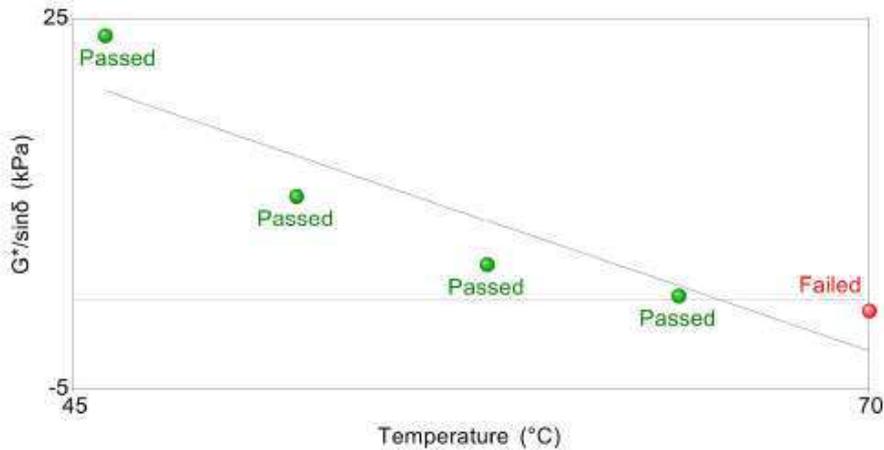
**RESULTS**

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	2.26	10.0	73.4	22.6	23.6	Pass
2	10.0	52.0	1.02	10.0	73.6	10.2	10.6	Pass
3	10.0	58.0	0.48	10.0	73.7	4.83	5.04	Pass
4	10.0	64.0	0.24	10.0	74.4	2.42	2.51	Pass
5	10.0	70.0	0.13	10.0	75.7	1.27	1.31	Fail

DSR Report, continued

**FAIL GRAPH**

Sample Name: PG RTFOT 55/75 + 4% OM  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG RTFOT\PG RTFOT CAP 55 75 + 4% OM .tri  
 Fail Temperature: 65.3 °C



# DSR Report

## SAMPLE INFORMATION

Sample Name: PG RTFOT 55/75 + 5% OM  
Operator: DANIEL  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG RTFOT\PG RTFOT CAP 55 75 + 5% OM.tr  
Time and Date: 6/22/2015 6:11:04 PM

## DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: RTFO Residue  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu\text{m}$

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

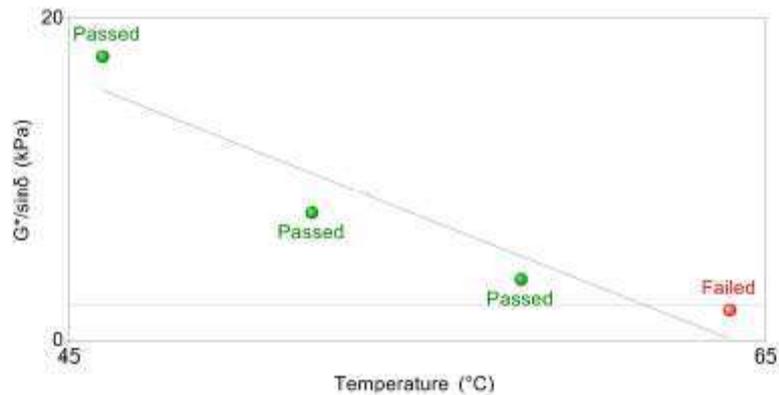
## RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Pa	Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G''/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0		1.70	10.0	74.8	17.0	17.7	Pass
2	10.0	52.0		0.77	10.0	74.6	7.66	7.95	Pass
3	10.0	58.0		0.37	10.0	74.9	3.67	3.80	Pass
4	10.0	64.0		0.19	10.1	75.8	1.85	1.91	Fail

DSR Report, continued

## FAIL GRAPH

Sample Name: PG RTFOT 55/75 + 5% OM  
File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG RTFOT\PG RTFOT CAP 55 75 + 5% OM.tr  
Fail Temperature: 61.6 °C



# DSR Report

## SAMPLE INFORMATION

Sample Name: PG RTFOT 55/75 + 6% OM  
Operator: DANIEL  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIO\ensaio 2015\Fabiano\PG RTFOT\CAP 55/75 + 6% OM 2.tri  
Time and Date: 8/31/2015 5:10:33 PM

## DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: RTFO Residue  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu$ m

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

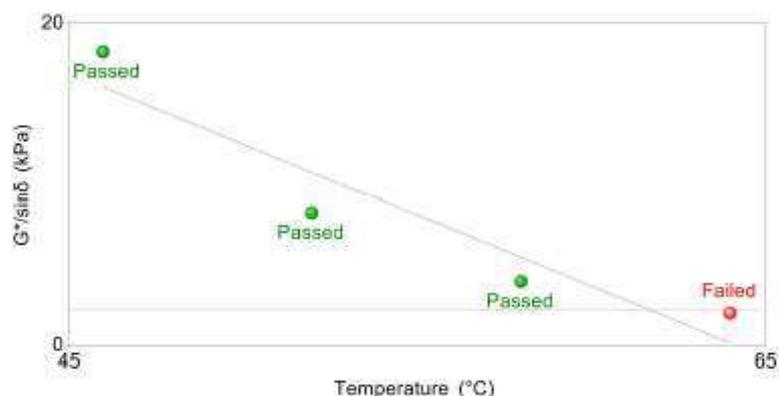
## RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G''/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	1.76	10.1	73.6	17.5	18.2	Pass
2	10.0	52.0	0.79	10.0	73.7	7.92	8.25	Pass
3	10.0	58.0	0.38	10.1	74.1	3.81	3.97	Pass
4	10.0	64.0	0.19	9.9	75.1	1.94	2.01	Fail

DSR Report, continued

## FAIL GRAPH

Sample Name: PG RTFOT 55/75 + 6% OM  
File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIO\ensaio 2015\Fabiano\PG RTFOT\CAP 55/75 + 6% OM 2.tri  
Fail Temperature: 61.7 °C



# DSR Report

## SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 55/75 + 4% OL  
Operator: DANIEL  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSA\IOS\Fabiano\PG\CAP 5575 + 4% OL.tri  
Time and Date: 6/11/2015 10:01:47 AM

## DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: Original Binder  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu$ m

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

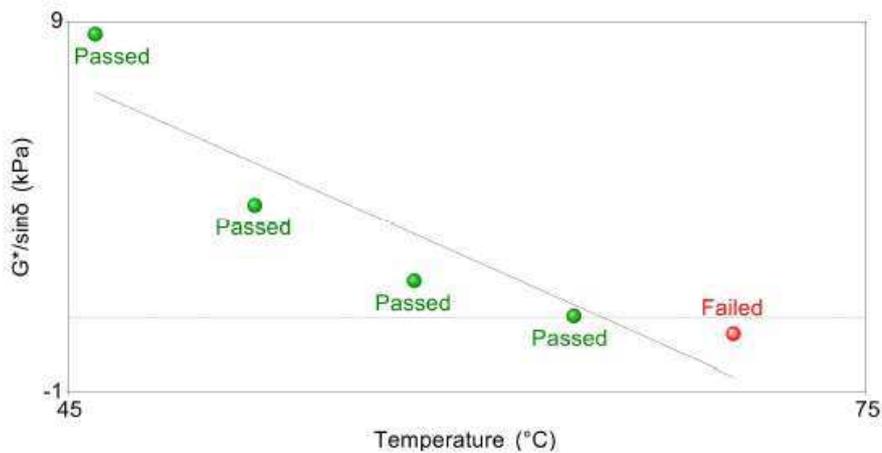
## RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G* kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	1.01	12.0	75.8	8.40	8.67	Pass
2	10.0	52.0	0.47	12.1	75.8	3.91	4.04	Pass
3	10.0	58.0	0.23	12.0	76.5	1.93	1.99	Pass
4	10.0	64.0	0.12	12.0	77.7	1.01	1.03	Pass
5	10.0	70.0	0.07	12.0	79.3	0.546	0.555	Fail

DSR Report, continued

## FAIL GRAPH

Sample Name: CAP 55/75 + 4% OL  
File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSA\IOS\Fabiano\PG\CAP 5575 + 4% OL.tri  
Fail Temperature: 65.0 °C



# DSR Report

## SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 55/75 + 5% OL  
Operator: DANIEL  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5575 + 5% OL.tri  
Time and Date: 6/11/2015 12:43:51 PM

## DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: Original Binder  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu\text{m}$

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

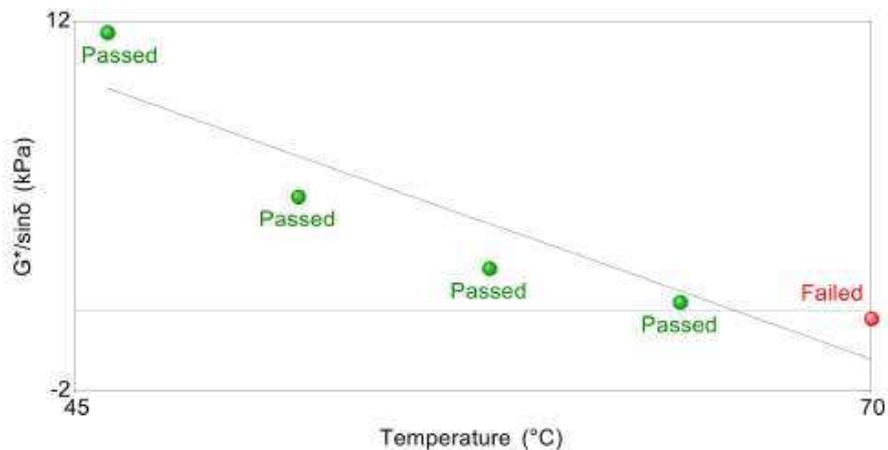
## RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. $^{\circ}\text{C}$	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	$G^*$ kPa	$G^*/\sin(\delta)$ kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	1.34	12.0	75.1	11.2	11.6	Pass
2	10.0	52.0	0.62	12.0	75.1	5.19	5.36	Pass
3	10.0	58.0	0.30	12.0	75.7	2.54	2.62	Pass
4	10.0	64.0	0.16	12.0	76.8	1.31	1.34	Pass
5	10.0	70.0	0.08	12.0	78.4	0.707	0.722	Fail

DSR Report, continued

## FAIL GRAPH

Sample Name: CAP 55/75 + 5% OL  
File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5575 + 5% OL.tri  
Fail Temperature: 65.8  $^{\circ}\text{C}$



# DSR Report

## SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 55/75 + 6% OL  
Operator: DANIEL  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5575 + 6% OL.tri  
Time and Date: 6/12/2015 2:30:44 PM

## DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: Original Binder  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu\text{m}$

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

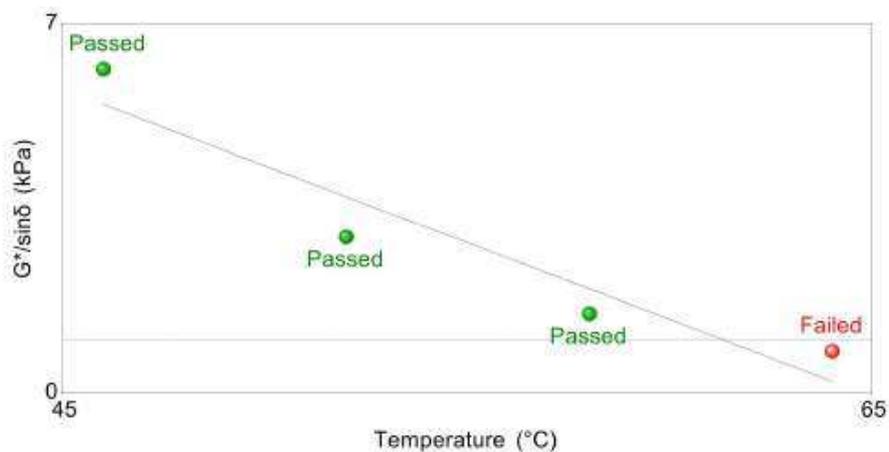
## RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. $^{\circ}\text{C}$	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G'/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	0.71	12.0	75.8	5.95	6.14	Pass
2	10.0	52.0	0.34	12.0	76.2	2.87	2.96	Pass
3	10.0	58.0	0.18	12.0	77.1	1.46	1.49	Pass
4	10.0	64.0	0.09	12.0	78.5	0.768	0.784	Fail

DSR Report, continued

## FAIL GRAPH

Sample Name: CAP 55/75 + 6% OL  
File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\PG\CAP 5575 + 6% OL.tri  
Fail Temperature: 61.3  $^{\circ}\text{C}$



**ANNEXO II – ENSAIO DE FLUÊNCIA E RECUPERAÇÃO SOBRE TENSÃO MÚLTIPLA – MSCR**

## Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

### SAMPLE INFORMATION

Sample Name: MSCR 50/70  
Operator: Daniel  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\MSCRMSCR\MSCR CAP 50 70.tri  
Time and Date: 7/1/2015 3:43:56 PM

### DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: MSCR  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu\text{m}$

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

### RESULTS

Test Temperature:	64.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	40.9%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	3.1%
$R_{diff}$ - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	92.3%
$J_{nr 0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	0.02kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr 3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	0.03kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	70.0%

The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer

## Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

### SAMPLE INFORMATION

Sample Name: MSCR 50/70 + 4% OM  
Operator: Daniel  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSA\OS\Fabiano\MSCRMSCR CAP 50 70 (1).tri  
Time and Date: 7/1/2015 5:29:09 PM

### DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: MSCR  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu\text{m}$

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

### RESULTS

Test Temperature:	64.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	43.5%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	2.9%
$R_{diff}$ - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	93.4%
$J_{nr 0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	0.02kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr 3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	0.04kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	78.8%

The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer

## Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

### SAMPLE INFORMATION

Sample Name: MSCR 50/70 + 5% OM  
Operator: Daniel  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSA\OS\Fabiano\MSCR\MSCR CAP 50 70 + 5% OM.tri  
Time and Date: 7/1/2015 6:29:16 PM

### DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: MSCR  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu\text{m}$

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

### RESULTS

Test Temperature:	58.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	43.9%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	2.8%
$R_{diff}$ - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	93.6%
$J_{nr 0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	0.01kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr 3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	0.02kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	79.4%

The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer

## Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

### SAMPLE INFORMATION

Sample Name: MSCR 50/70 + 6% OM  
Operator: Daniel  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSA\IOS\Fabiano\MSCR\MSCR CAP 50 70 + 6% OM.tri  
Time and Date: 7/2/2015 10:59:16 AM

### DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: MSCR  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu$ m

Warning: The test was run with out of date or missing calibrations

### RESULTS

Test Temperature:	58.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	10.3%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	1.6%
$R_{diff}$ - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	84.5%
$J_{nr 0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	0.03kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr 3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	0.03kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	9.2%

The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer

## Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

### SAMPLE INFORMATION

Sample Name: MSCR 50/70 + 4% OLinhaca (renew2)  
Operator: Daniel  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2015\Fabiano\MSCR\CAP 50 70 + 4%  
OLinhaca (renew2).tri  
Time and Date: 10/15/2015 12:05:38 PM

### DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: MSCR  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu\text{m}$

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

### RESULTS

Test Temperature:	58.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	38.0%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	1.3%
$R_{diff}$ - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	91.8%
$J_{nr 0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	0.04kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr 3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	0.05kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	20.6%

The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer

## Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

### SAMPLE INFORMATION

Sample Name: MSCR 50/70 + 5% OL  
Operator: Daniel  
Project:  
Notes:  
File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\MSCR\MSCR CAP 50 70 + 5% OL tri  
Time and Date: 7/2/2015 7:14:44 PM

### DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: MSCR  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu$ m

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

### RESULTS

Test Temperature:	58.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	34.5%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	2.2%
$R_{diff}$ - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	93.6%
$J_{ir 0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	0.02kPa <sup>-1</sup>
$J_{ir 3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	0.03kPa <sup>-1</sup>
$J_{ir diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	52.9%

The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer

## Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

### SAMPLE INFORMATION

Sample Name: MSCR 50/70 + 6% OL  
Operator: Daniel  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSA\OS\Fabiano\MSCR\MSCR CAP 50 70 + 6% OL.tri  
Time and Date: 7/6/2015 12:31:33 PM

### DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: MSCR  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu\text{m}$

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

### RESULTS

Test Temperature:	58.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	32.8%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	2.9%
$R_{diff}$ - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	91.1%
$J_{ir 0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	0.02kPa <sup>-1</sup>
$J_{ir 3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	0.03kPa <sup>-1</sup>
$J_{ir diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	47.4%

The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer

## Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

### SAMPLE INFORMATION

Sample Name: MSCR 55/75  
Operator: Daniel  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSA\IOS\Fabiano\MSCR\MSCR CAP 55 75.tri  
Time and Date: 7/1/2015 4:37:33 PM

### DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: MSCR  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu\text{m}$

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

### RESULTS

Test Temperature:	70.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	38.0%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	33.0%
$R_{diff}$ - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	13.3%
$J_{nr,0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	0.02kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr,3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	0.02kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr, diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	7.2%

The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer

## Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

### SAMPLE INFORMATION

Sample Name: MSCR 55/75 + 4% OMamona (renew)  
Operator: Daniel  
Project:  
Notes:  
File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSA\IOS\ensaios 2015\Fabiano\MSCR\CAP 55 75 + 4%  
OMamona (renew).tri  
Time and Date: 10/14/2015 12:27:51 PM

### DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: MSCR  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu$ m

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

### RESULTS

Test Temperature:	64.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	39.7%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	32.9%
$R_{diff}$ - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	17.1%
$J_{nr 0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	0.02kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr 3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	0.02kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	11.4%

The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer

## Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

### SAMPLE INFORMATION

Sample Name: MSCR 55/75 + 5% OM  
Operator: Daniel  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSA\OS\Fabiano\MSCR\MSCR CAP 55 75 + 5% OM.tri  
Time and Date: 7/2/2015 3:49:05 PM

### DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: MSCR  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu$ m

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

### RESULTS

Test Temperature:	58.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	39.1%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	37.4%
$R_{diff}$ - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	4.2%
$J_{nr 0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	0.01kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr 3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	0.01kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	1.5%

The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer

# DSR Report

## Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

### SAMPLE INFORMATION

Sample Name: MSCR 55/75 + 6% OM  
Operator: Daniel  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSA\IOS\Fabiano\MSCR\MSCR CAP 55.75 + 6% OM.tri  
Time and Date: 7/2/2015 4:47:43 PM

### DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: MSCR  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu\text{m}$

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

### RESULTS

Test Temperature:	58.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	52.6%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	35.9%
$R_{diff}$ - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	31.9%
$J_{nr 0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	0.01kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr 3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	0.01kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	39.0%

The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer

## Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

### SAMPLE INFORMATION

Sample Name: MSCR 55/75 + 4% OL  
Operator: Daniel  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\MSCRMSCR CAP 55 75 + 4% OL.tri  
Time and Date: 7/6/2015 3:48:26 PM

### DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: MSCR  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu$ m

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

### RESULTS

Test Temperature:	64.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	41.8%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	31.3%
$R_{diff}$ - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	25.2%
$J_{ir 0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	0.02kPa <sup>-1</sup>
$J_{ir 3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	0.02kPa <sup>-1</sup>
$J_{ir diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	18.6%

The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer

# DSR Report

## Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

### SAMPLE INFORMATION

Sample Name: MSCR 55/75 + 5% OL  
Operator: Daniel  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSA\OS\Fabiano\MSCR\MSCR CAP 55 75 + 5% OL.tri  
Time and Date: 7/6/2015 4:43:37 PM

### DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: MSCR  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu\text{m}$

Warning: The test was run with out of date or missing calibrations

### RESULTS

Test Temperature:	58.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	31.3%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	34.5%
$R_{diff}$ - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	-10.4%
$J_{ir,0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	0.01kPa <sup>-1</sup>
$J_{ir,3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	0.01kPa <sup>-1</sup>
$J_{ir,diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	-4.2%

The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer

# DSR Report

## Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

### SAMPLE INFORMATION

Sample Name: MSCR 55/75 + 6% OL  
Operator: Daniel  
Project:  
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\Fabiano\MSCR\MSCR CAP 55 75 + 6% OL.tri  
Time and Date: 7/6/2015 5:58:45 PM

### DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
Model:  
Bearing Type:  
Temperature Control:  
Test: MSCR  
Geometry Diameter: 25.0 mm  
Gap: 1000  $\mu$ m

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

### RESULTS

Test Temperature:	58.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	48.2%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	35.4%
$R_{diff}$ - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	28.6%
$J_{ir 0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	0.01kPa <sup>-1</sup>
$J_{ir 3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	0.01kPa <sup>-1</sup>
$J_{ir diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	27.4%

The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer

**ANEXO III – ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA**

## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian; NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load  
 Data file name D:\Meus documentos\Daniel\IM 5070 cp3 br.D003  
 Template file C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\vb123.P003  
 Project:  
 Operator:  
 Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25  
 Waveshape: Haversine  
 Loading pulse width (ms): 100  
 Rest period (ms): 900  
 Pulse repetition period (ms): 1000  
 Number of conditioning pulses: 5  
 Contact load (N): 55  
 Cyclic load (N): 1040  
 Estimated Poisson's ratio: 0.3

### Specimen Information

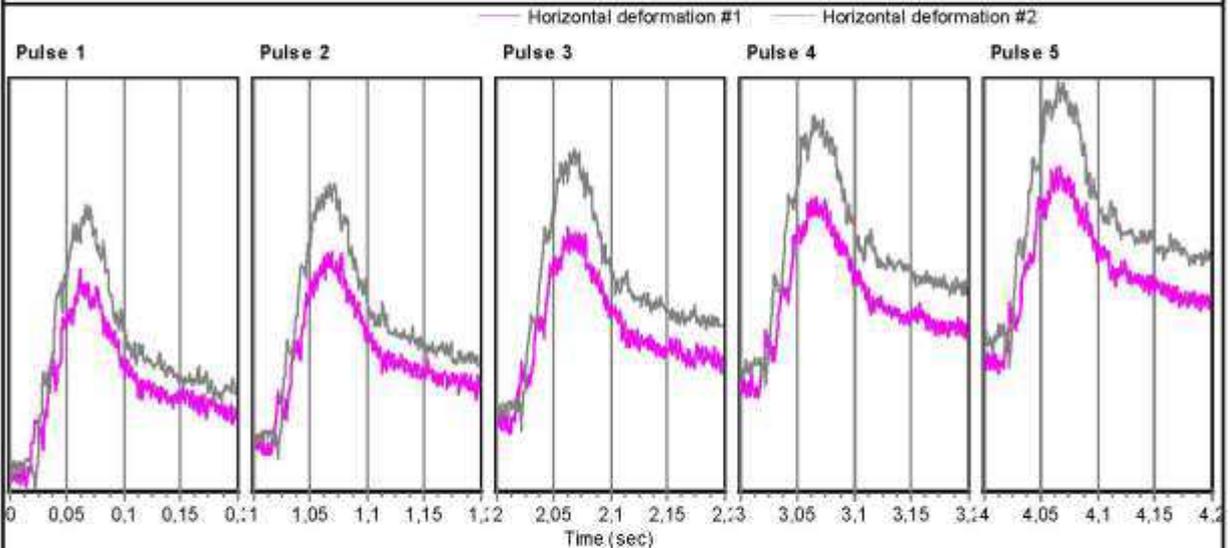
Identification:  
 Conditioning time:  
 Properties/Comments:

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Diameter (mm)	102,0						102,0	
Height (mm)	66,0						66,0	
							Cross-sectional area (mm <sup>2</sup> ):	8171.3

### Test Results

Test date & time: sexta-feira, dezembro 4, 2015, at 09:14  
 Conditioning pulses: 5  
 Core temperature (°C): 29.4  
 Surface temperature (°C): 29.4

OR Test Results Title	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	6451	6445	6635	6517	6546	6519	69,87	1,07
Modulus of loading (MPa)	4031	4030	4070	3966	4065	4032	37,20	0,92
Instantaneous horizontal deformation (µm)	1,390	1,393	1,355	1,376	1,369	1,377	0,01	1,04
Horizontal loading deformation (µm)	2,225	2,228	2,208	2,261	2,205	2,225	0,02	0,91
Maximum load (N)	1094	1095	1096	1096	1096	1095	0,78	0,07
Cyclic load (N)	1038	1040	1041	1038	1038	1039	1,12	0,11
Contact load (N)	56	55	56	57	58	56	1,12	1,99



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian; NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load  
 Data file name: D:\Meus documentos\Daniel\IM 5070 cp4 br.D003  
 Template file: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\vb123.P003  
 Project:  
 Operator:  
 Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25  
 Waveshape: Haversine  
 Loading pulse width (ms): 100  
 Rest period (ms): 900  
 Pulse repetition period (ms): 1000  
 Number of conditioning pulses: 5  
 Contact load (N): 55  
 Cyclic load (N): 1040  
 Estimated Poisson's ratio: 0.3

### Specimen Information

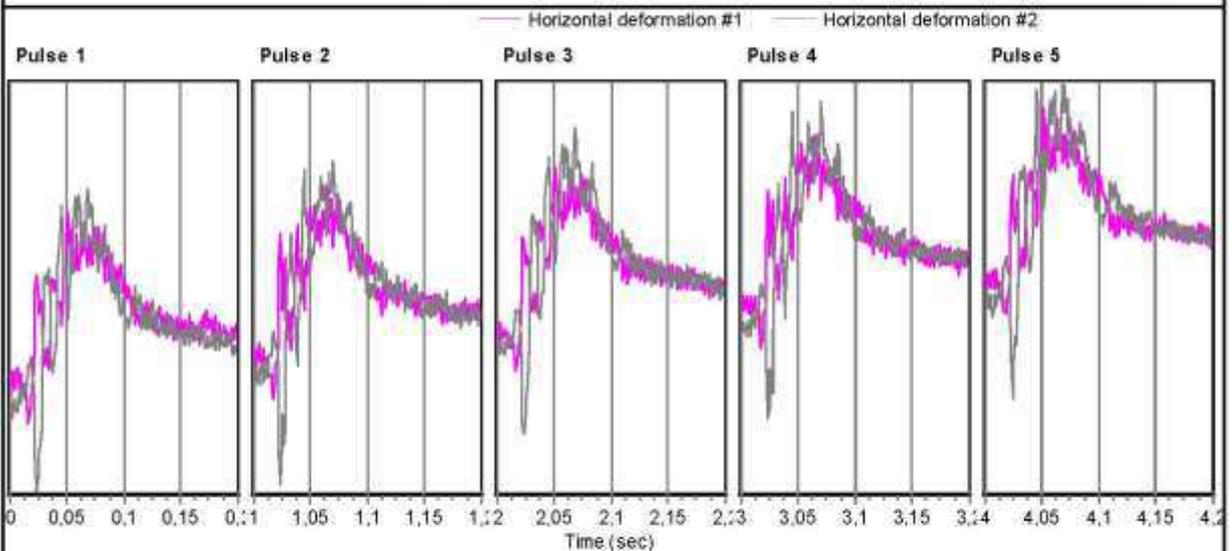
Identification:  
 Conditioning time:  
 Properties/Comments:

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Diameter (mm)	102,0						102,0	
Height (mm)	66,0						66,0	
Cross-sectional area (mm <sup>2</sup> ): 8171,3								

### Test Results

Test date & time: sexta-feira, dezembro 4, 2015, at 09:25  
 Conditioning pulses: 5  
 Core temperature (°C): 29,4  
 Surface temperature (°C): 29,4

ORTestResultsTitle	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	7083	6871	7133	7358	6968	7083	165,08	2,33
Modulus of loading (MPa)	4415	4386	4396	4593	4506	4459	79,24	1,78
Instantaneous horizontal deformation (µm)	1,267	1,309	1,253	1,216	1,291	1,267	0,03	2,53
Horizontal loading deformation (µm)	2,032	2,051	2,032	1,948	1,996	2,012	0,04	1,82
Maximum load (N)	1096	1096	1093	1093	1099	1096	2,26	0,21
Cyclic load (N)	1039	1041	1035	1036	1041	1039	2,79	0,27
Contact load (N)	57	54	59	57	58	57	1,56	2,73



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian; NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load  
 Data file name: D:\Meus documentos\Daniel\MS070 OM cp1 br.D003  
 Template file: C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Templates\vb123.P003  
 Project:  
 Operator:  
 Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25  
 Waveshape: Haversine  
 Loading pulse width (ms): 100  
 Rest period (ms): 900  
 Pulse repetition period (ms): 1000  
 Number of conditioning pulses: 5  
 Contact load (N): 46  
 Cyclic load (N): 650  
 Estimated Poisson's ratio: 0.3

### Specimen Information

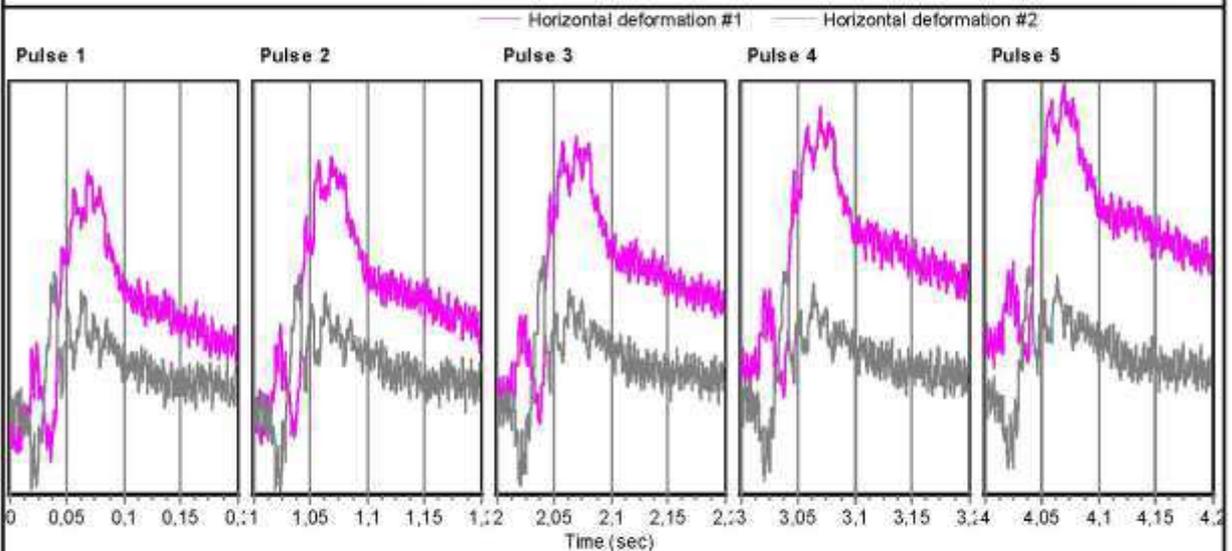
Identification:  
 Conditioning time:  
 Properties/Comments:

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Diameter (mm)	102,0						102,0	
Height (mm)	66,0						66,0	
							Cross-sectional area (mm <sup>2</sup> ):	8171,3

### Test Results

Test date & time: quinta-feira, dezembro 3, 2015, at 10:18  
 Conditioning pulses: 5  
 Core temperature (°C): 29,4  
 Surface temperature (°C): 29,4

ORTestResultsTitle	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	6488	6093	5831	5983	5600	5999	295,17	4,92
Modulus of loading (MPa)	3457	3457	3355	3492	3357	3423	56,62	1,65
Instantaneous horizontal deformation (µm)	0,867	0,923	0,965	0,936	0,997	0,938	0,04	4,62
Horizontal loading deformation (µm)	1,628	1,628	1,677	1,604	1,663	1,640	0,03	1,61
Maximum load (N)	697	696	695	696	696	696	0,75	0,11
Cyclic load (N)	652	652	652	648	646	650	2,18	0,34
Contact load (N)	46	44	43	47	50	46	2,19	4,75



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian; NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load  
 Data file name: D:\Meus documentos\Daniel\MS070 OM cp2 br.D003  
 Template file: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\vb123.P003  
 Project:  
 Operator:  
 Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25  
 Waveshape: Haversine  
 Loading pulse width (ms): 100  
 Rest period (ms): 900  
 Pulse repetition period (ms): 1000  
 Number of conditioning pulses: 5  
 Contact load (N): 40  
 Cyclic load (N): 656  
 Estimated Poisson's ratio: 0.3

### Specimen Information

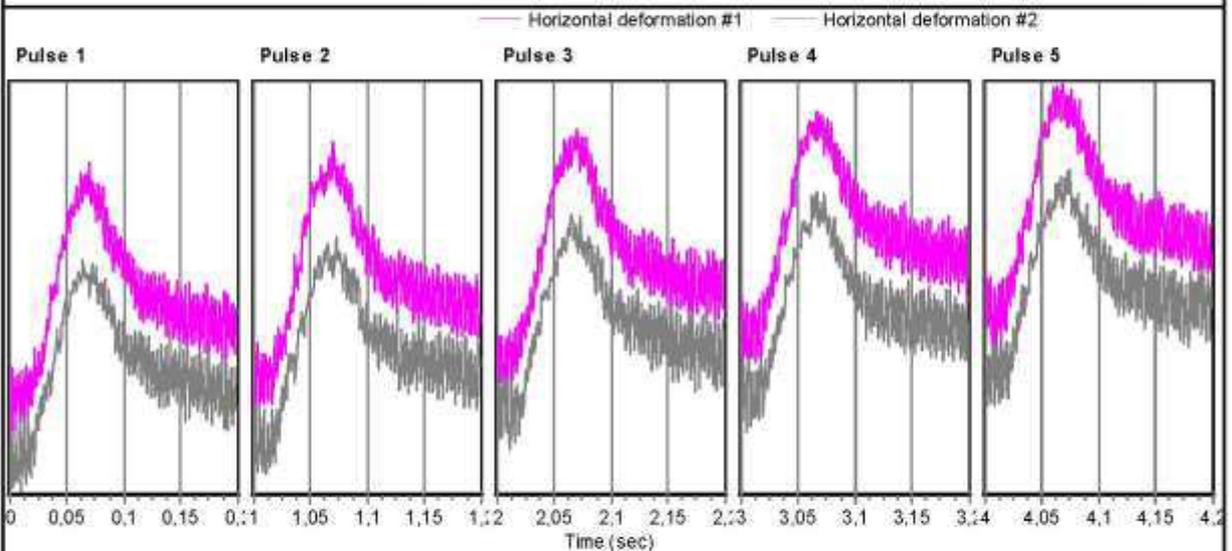
Identification:  
 Conditioning time:  
 Properties/Comments:

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Diameter (mm)	102,0						102,0	
Height (mm)	66,0						66,0	
							Cross-sectional area (mm <sup>2</sup> ):	8171,3

### Test Results

Test date & time: quinta-feira, dezembro 3, 2015, at 10:23  
 Conditioning pulses: 5  
 Core temperature (°C): 29,4  
 Surface temperature (°C): 29,4

ORTestResultsTitle	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	5712	5852	5716	5733	5549	5712	96,41	1,69
Modulus of loading (MPa)	3274	3405	3473	3517	3628	3459	117,57	3,40
Instantaneous horizontal deformation (µm)	0,991	0,969	0,992	0,987	1,019	0,992	0,02	1,59
Horizontal loading deformation (µm)	1,729	1,666	1,633	1,609	1,556	1,639	0,06	3,47
Maximum load (N)	695	696	696	696	698	696	1,03	0,15
Cyclic load (N)	655	657	657	655	655	656	0,92	0,14
Contact load (N)	40	39	39	40	43	40	1,70	4,22



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian; NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load  
 Data file name: D:\Meus documentos\Daniel\IM 5070 OL cp3 br.D003  
 Template file: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\vb123.P003  
 Project:  
 Operator:  
 Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25  
 Waveshape: Haversine  
 Loading pulse width (ms): 100  
 Rest period (ms): 900  
 Pulse repetition period (ms): 1000  
 Number of conditioning pulses: 5  
 Contact load (N): 45  
 Cyclic load (N): 700  
 Estimated Poisson's ratio: 0.3

### Specimen Information

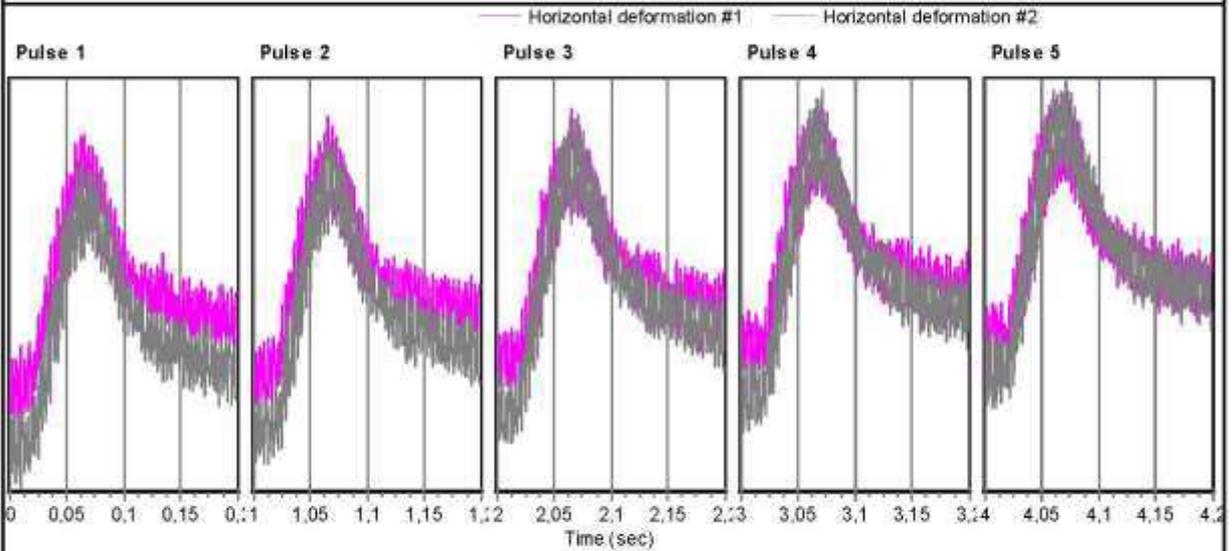
Identification:  
 Conditioning time:  
 Properties/Comments:

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Diameter (mm)	100,0						100,0	
Height (mm)	66,0						66,0	
							Cross-sectional area (mm <sup>2</sup> ):	7854,0

### Test Results

Test date & time: sexta-feira, dezembro 4, 2015, at 09:55  
 Conditioning pulses: 5  
 Core temperature (°C): 29,4  
 Surface temperature (°C): 29,4

ORTestResultsTitle	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	5226	4930	4931	4810	4738	4927	166,75	3,38
Modulus of loading (MPa)	3149	3004	3083	3063	3109	3082	48,38	1,57
Instantaneous horizontal deformation (µm)	1,157	1,228	1,224	1,255	1,271	1,227	0,04	3,17
Horizontal loading deformation (µm)	1,921	2,016	1,957	1,970	1,937	1,960	0,03	1,66
Maximum load (N)	746	745	744	745	745	745	0,78	0,10
Cyclic load (N)	700	701	699	697	699	699	1,33	0,19
Contact load (N)	46	44	45	47	47	46	1,08	2,36



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian; NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load  
 Data file name: D:\Meus documentos\Daniel\IM 5070 OL cp2 br.D003  
 Template file: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\vb123.P003  
 Project:  
 Operator:  
 Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25  
 Waveshape: Haversine  
 Loading pulse width (ms): 100  
 Rest period (ms): 900  
 Pulse repetition period (ms): 1000  
 Number of conditioning pulses: 5  
 Contact load (N): 45  
 Cyclic load (N): 700  
 Estimated Poisson's ratio: 0.3

### Specimen Information

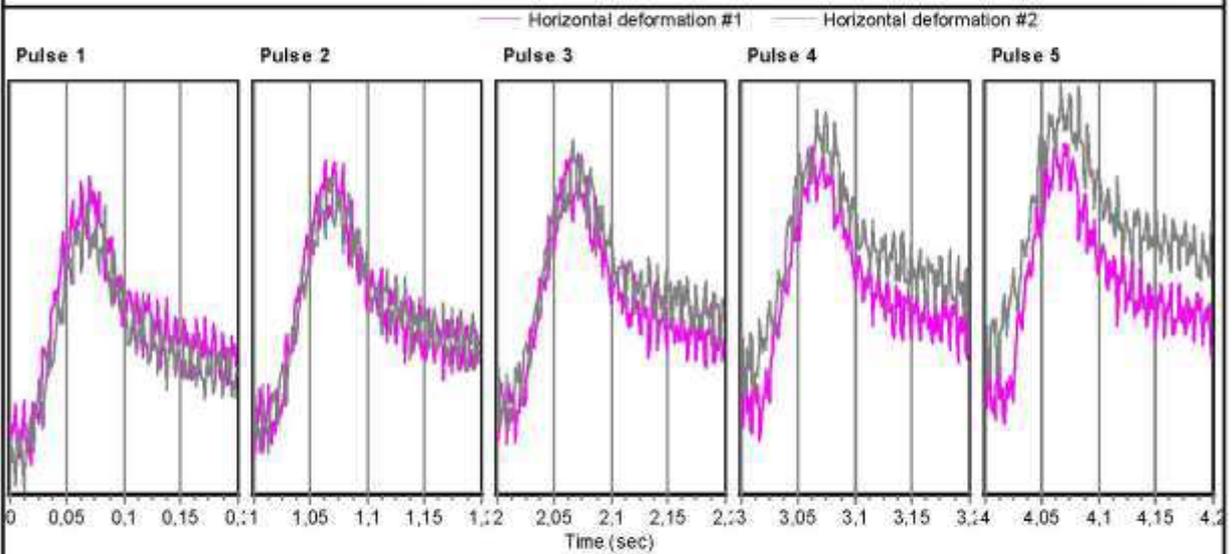
Identification:  
 Conditioning time:  
 Properties/Comments:

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std. Dev.
Diameter (mm)	102,0						102,0	
Height (mm)	64,0						64,0	
							Cross-sectional area (mm <sup>2</sup> ):	8171,3

### Test Results

Test date & time: quinta-feira, dezembro 3, 2015, at 11:32  
 Conditioning pulses: 5  
 Core temperature (°C): 29,4  
 Surface temperature (°C): 29,4

ORTestResultsTitle	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	5582	5402	5542	5288	5449	5453	104,32	1,91
Modulus of loading (MPa)	3389	3291	3357	3363	3271	3334	45,22	1,36
Instantaneous horizontal deformation (µm)	1,114	1,152	1,127	1,180	1,140	1,142	0,02	1,98
Horizontal loading deformation (µm)	1,835	1,891	1,860	1,855	1,899	1,868	0,02	1,28
Maximum load (N)	744	744	745	746	745	745	0,92	0,12
Cyclic load (N)	698	699	701	700	697	699	1,42	0,20
Contact load (N)	46	45	44	46	48	46	1,28	2,79



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian; NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load  
 Data file name: D:\Meus documentos\Daniel\IM 5575 cp1 brazilian.D003  
 Template file: C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Templates\vb123.P003  
 Project:  
 Operator:  
 Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25  
 Waveshape: Haversine  
 Loading pulse width (ms): 100  
 Rest period (ms): 900  
 Pulse repetition period (ms): 1000  
 Number of conditioning pulses: 5  
 Contact load (N): 57  
 Cyclic load (N): 950  
 Estimated Poisson's ratio: 0.3

### Specimen Information

Identification:  
 Conditioning time:  
 Properties/Comments:

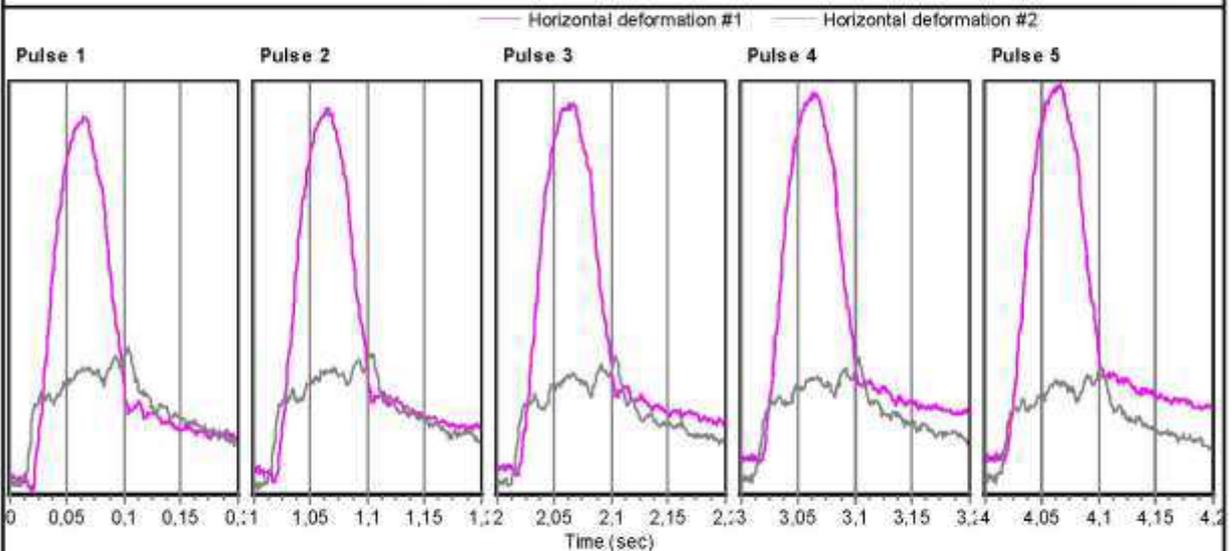
Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Diameter (mm)	102,0						102,0	
Height (mm)	66,0						66,0	

Cross-sectional area (mm<sup>2</sup>): 8171,3

### Test Results

Test date & time: quinta-feira, dezembro 3, 2015, at 09:10  
 Conditioning pulses: 5  
 Core temperature (°C): 29,4  
 Surface temperature (°C): 29,4

ORTestResultsTitle	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	2597	2662	2508	2512	2454	2547	73,71	2,89
Modulus of loading (MPa)	1825	1836	1823	1851	1840	1835	10,45	0,57
Instantaneous horizontal deformation (µm)	3,153	3,077	3,279	3,268	3,324	3,220	0,09	2,83
Horizontal loading deformation (µm)	4,488	4,460	4,512	4,435	4,433	4,466	0,03	0,68
Maximum load (N)	1006	1006	1009	1008	1003	1006	1,89	0,19
Cyclic load (N)	948	948	952	951	945	949	2,58	0,27
Contact load (N)	57	57	56	57	59	57	0,75	1,30



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian; NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load  
 Data file name: D:\Meus documentos\Daniel\IM 5575 cp 2 brazilian.D003  
 Template file: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\vb123.P003  
 Project:  
 Operator:  
 Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25  
 Waveshape: Haversine  
 Loading pulse width (ms): 100  
 Rest period (ms): 900  
 Pulse repetition period (ms): 1000  
 Number of conditioning pulses: 5  
 Contact load (N): 57  
 Cyclic load (N): 950  
 Estimated Poisson's ratio: 0.3

### Specimen Information

Identification:  
 Conditioning time:  
 Properties/Comments:

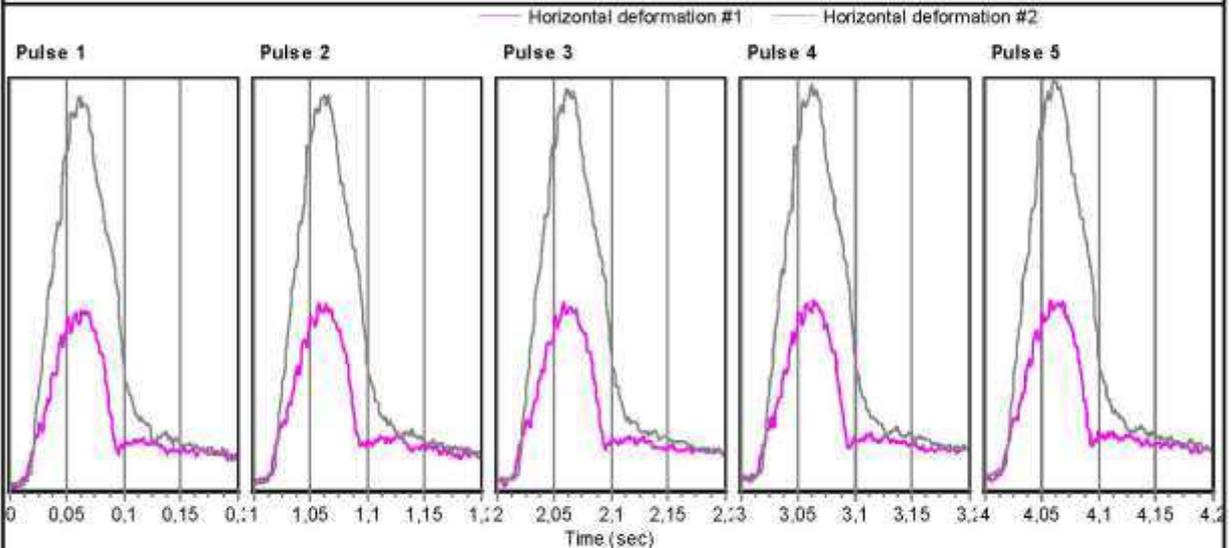
Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Diameter (mm)	102,0						102,0	
Height (mm)	66,0						66,0	

Cross-sectional area (mm<sup>2</sup>): 8171,3

### Test Results

Test date & time: quinta-feira, dezembro 3, 2015, at 09:23  
 Conditioning pulses: 5  
 Core temperature (°C): 29,4  
 Surface temperature (°C): 29,4

ORTestResultsTitle	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	1760	1740	1699	1689	1693	1716	28,47	1,66
Modulus of loading (MPa)	1468	1455	1447	1448	1445	1453	8,48	0,58
Instantaneous horizontal deformation (µm)	4,662	4,719	4,817	4,846	4,842	4,777	0,07	1,55
Horizontal loading deformation (µm)	5,588	5,641	5,656	5,651	5,674	5,642	0,03	0,51
Maximum load (N)	1008	1009	1006	1006	1007	1007	1,22	0,12
Cyclic load (N)	950	951	948	948	949	949	1,22	0,13
Contact load (N)	58	58	58	58	58	58	0,00	0,00



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian; NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load  
 Data file name: D:\Meus documentos\Daniel\MS575 OM cp1 br.D003  
 Template file: C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Templates\vb123.P003  
 Project:  
 Operator:  
 Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25  
 Waveshape: Haversine  
 Loading pulse width (ms): 100  
 Rest period (ms): 900  
 Pulse repetition period (ms): 1000  
 Number of conditioning pulses: 5  
 Contact load (N): 40  
 Cyclic load (N): 739  
 Estimated Poisson's ratio: 0.3

### Specimen Information

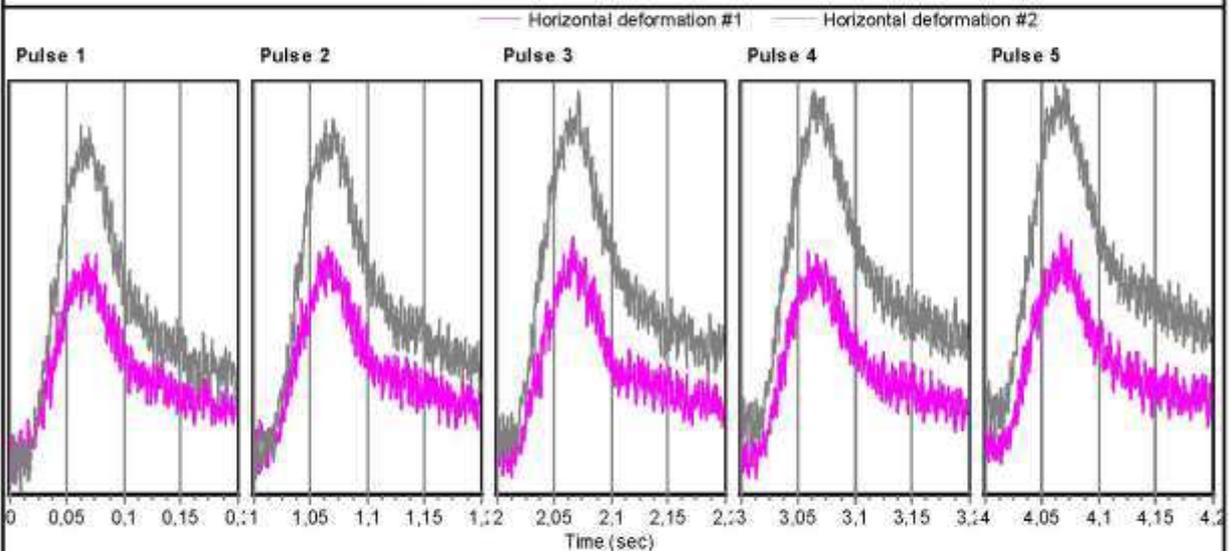
Identification:  
 Conditioning time:  
 Properties/Comments:

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Diameter (mm)	102,0						102,0	
Height (mm)	65,0						65,0	
							Cross-sectional area (mm <sup>2</sup> ):	8171,3

### Test Results

Test date & time: quinta-feira, dezembro 3, 2015, at 10:55  
 Conditioning pulses: 5  
 Core temperature (°C): 29,4  
 Surface temperature (°C): 29,4

ORTestResultsTitle	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	6471	5896	5389	5613	5615	5797	373,60	6,45
Modulus of loading (MPa)	3743	3731	3565	3650	3719	3682	66,54	1,81
Instantaneous horizontal deformation (µm)	1,001	1,099	1,198	1,153	1,152	1,120	0,07	6,04
Horizontal loading deformation (µm)	1,730	1,736	1,811	1,772	1,740	1,758	0,03	1,73
Maximum load (N)	779	780	777	779	779	779	0,75	0,10
Cyclic load (N)	739	739	736	738	738	738	0,84	0,11
Contact load (N)	40	41	41	41	41	41	0,31	0,74



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian; NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load  
 Data file name: D:\Meus documentos\Daniel\MS575 OM cp2 br.D003  
 Template file: C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Templates\vb123.P003  
 Project:  
 Operator:  
 Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25  
 Waveshape: Haversine  
 Loading pulse width (ms): 100  
 Rest period (ms): 900  
 Pulse repetition period (ms): 1000  
 Number of conditioning pulses: 5  
 Contact load (N): 40  
 Cyclic load (N): 739  
 Estimated Poisson's ratio: 0.3

### Specimen Information

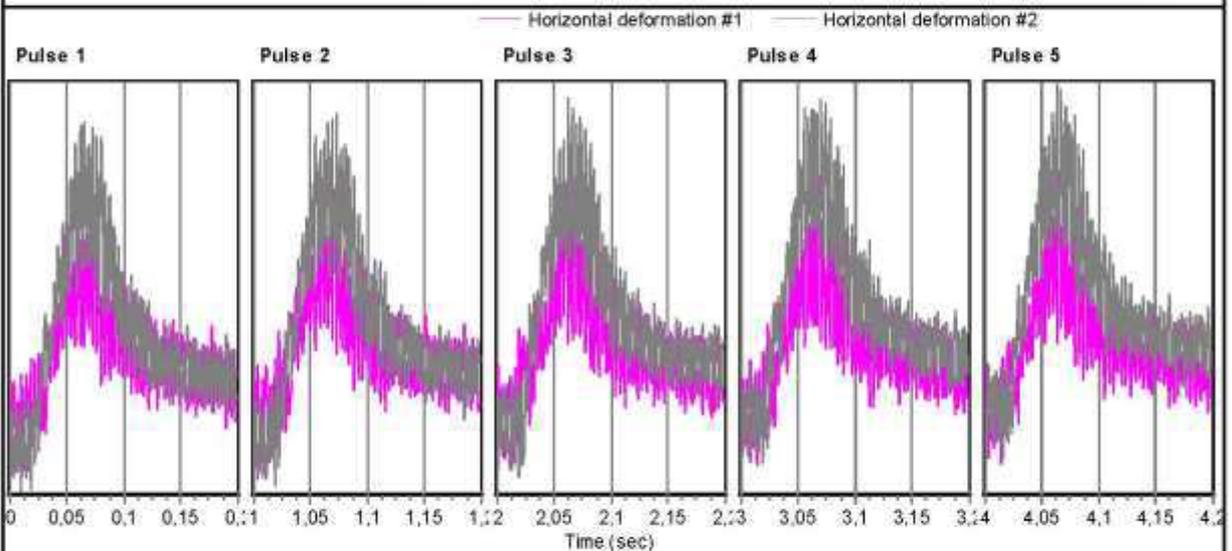
Identification:  
 Conditioning time:  
 Properties/Comments:

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Diameter (mm)	102,0						102,0	
Height (mm)	65,0						65,0	
							Cross-sectional area (mm <sup>2</sup> ):	8171,3

### Test Results

Test date & time: quinta-feira, dezembro 3, 2015, at 11:01  
 Conditioning pulses: 5  
 Core temperature (°C): 29,4  
 Surface temperature (°C): 29,4

ORTestResultsTitle	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	5830	5708	5878	5717	5577	5742	104,95	1,83
Modulus of loading (MPa)	3816	3900	3979	3783	3755	3846	82,04	2,13
Instantaneous horizontal deformation (µm)	1,109	1,133	1,102	1,130	1,160	1,127	0,02	1,82
Horizontal loading deformation (µm)	1,694	1,659	1,626	1,708	1,723	1,682	0,03	2,06
Maximum load (N)	779	779	778	777	779	778	0,89	0,11
Cyclic load (N)	737	738	739	737	738	738	0,57	0,08
Contact load (N)	42	41	40	40	41	41	0,92	2,25



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian: NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load

Data file name D:\Weus documentos\Daniel\M 5575 OL cp1 br.D003

Template file C:\PCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\vb123.P003

Project:

Operator:

Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25	Number of conditioning pulses: 5
Waveshape: Haversine	Contact load (N): 45
Loading pulse width (ms): 100	Cyclic load (N): 700
Rest period (ms): 900	Estimated Poisson's ratio: 0.3
Pulse repetition period (ms): 1000	

### Specimen Information

Identification:	Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Conditioning time:	Diameter (mm)	102,0						102,0	
Properties/Comments:	Height (mm)	64,0						64,0	
		Cross-sectional area (mm²): 8171,3							

### Test Results

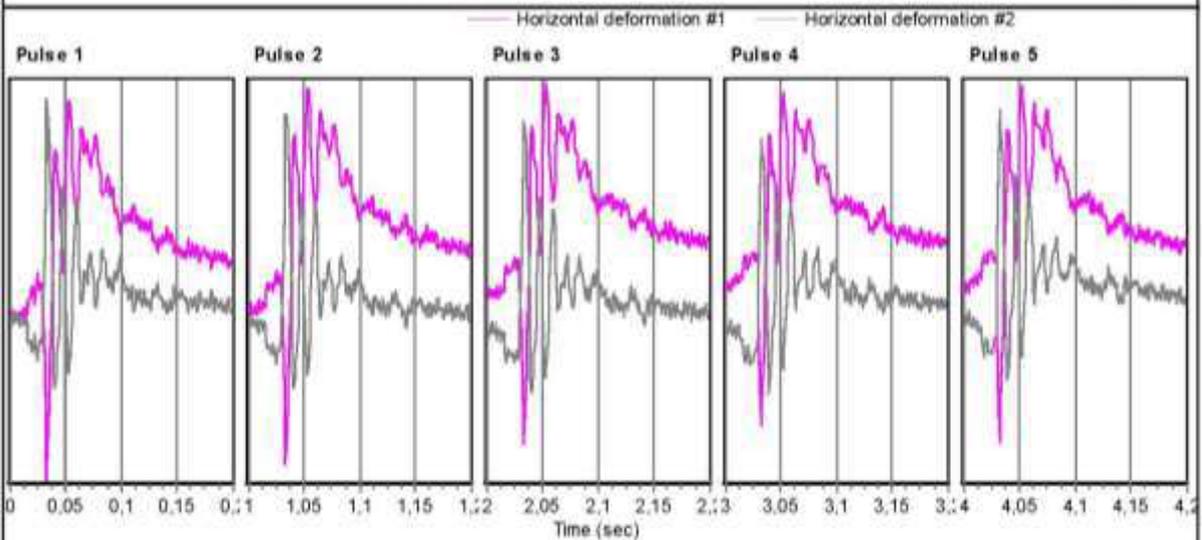
Test date & time: quinta-feira, dezembro 3, 2015, at 11:54

Conditioning pulses: 5

Core temperature (°C): 29,4

Surface temperature (°C): 29,4

QRTestResultsTitle	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	4728	4645	4470	4502	4308	4531	145,55	3,21
Modulus of loading (MPa)	2719	2680	2694	2756	2672	2704	30,50	1,13
Instantaneous horizontal deformation (µm)	1,319	1,346	1,397	1,377	1,427	1,373	0,04	2,75
Horizontal loading deformation (µm)	2,294	2,333	2,318	2,249	2,302	2,299	0,03	1,24
Maximum load (N)	744	745	745	745	742	744	1,03	0,14
Cyclic load (N)	700	702	701	696	690	698	4,30	0,62
Contact load (N)	43	43	43	49	52	46	3,50	7,57



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian; NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load  
 Data file name D:\Meus documentos\Daniel\M 5575 OL cp2 br.D003  
 Template file C:\IPCglobal\UTS003 IT Modulus Test\Templates\db123.P003  
 Project:  
 Operator:  
 Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25  
 Waveshape: Haversine  
 Loading pulse width (ms): 100  
 Rest period (ms): 900  
 Pulse repetition period (ms): 1000  
 Number of conditioning pulses: 5  
 Contact load (N): 45  
 Cyclic load (N): 700  
 Estimated Poisson's ratio: 0.3

### Specimen Information

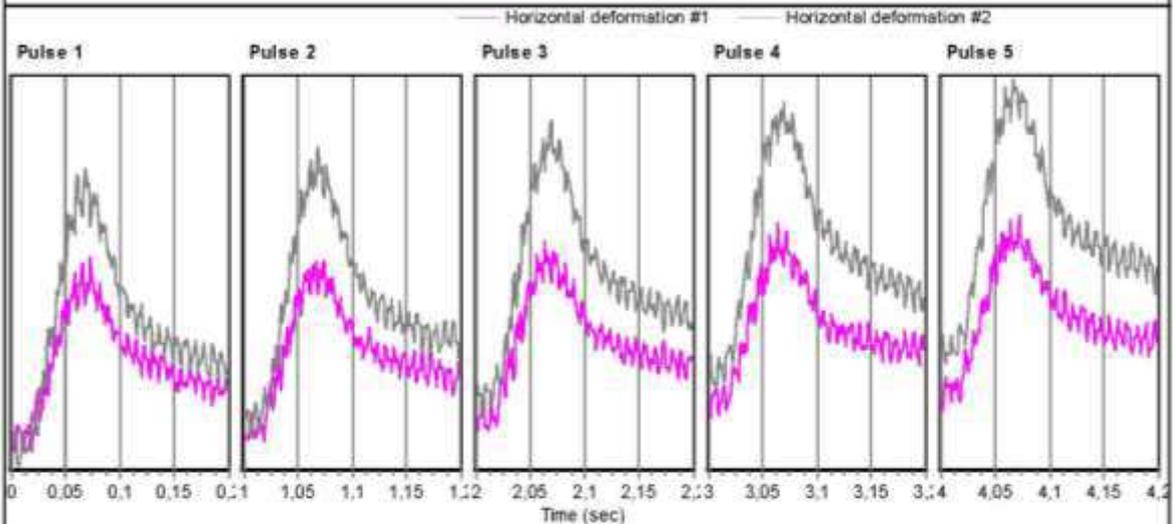
Identification:  
 Conditioning time:  
 Properties/Comments:

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Diameter (mm)	102.0						102.0	
Height (mm)	64.0						64.0	
Cross-sectional area (mm <sup>2</sup> ): 8171.3								

### Test Results

Test date & time: quinta-feira, dezembro 3, 2015, at 11:58  
 Conditioning pulses: 5  
 Core temperature (°C): 29.4  
 Surface temperature (°C): 29.4

QRTestResultsTitle	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	4051	4103	3978	3930	4016	4016	59.23	1.47
Modulus of loading (MPa)	2431	2496	2431	2512	2438	2461	34.96	1.42
Instantaneous horizontal deformation (µm)	1.538	1.520	1.566	1.578	1.546	1.550	0.02	1.32
Horizontal loading deformation (µm)	2.563	2.499	2.563	2.470	2.547	2.529	0.04	1.48
Maximum load (N)	746	746	745	745	745	746	0.57	0.08
Cyclic load (N)	700	700	700	697	697	699	1.48	0.21
Contact load (N)	47	46	45	49	48	47	1.42	3.02



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian: NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load

Data file name: D:\Meus documentos\Daniel\5 5070 cp1 br.D003

Template file: C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Templates\db123.P003

Project:

Operator:

Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25	Number of conditioning pulses: 5
Waveshape: Haversine	Contact load (N): 50
Loading pulse width (ms): 100	Cyclic load (N): 1055
Rest period (ms): 900	Estimated Poisson's ratio: 0.3
Pulse repetition period (ms): 1000	

### Specimen Information

Identification:	Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.	
Conditioning time:	Diameter (mm)	101,0						101,0		
Properties/Comments:	Height (mm)	66,0						66,0		
		Cross-sectional area (mm²): 8011,8								

### Test Results

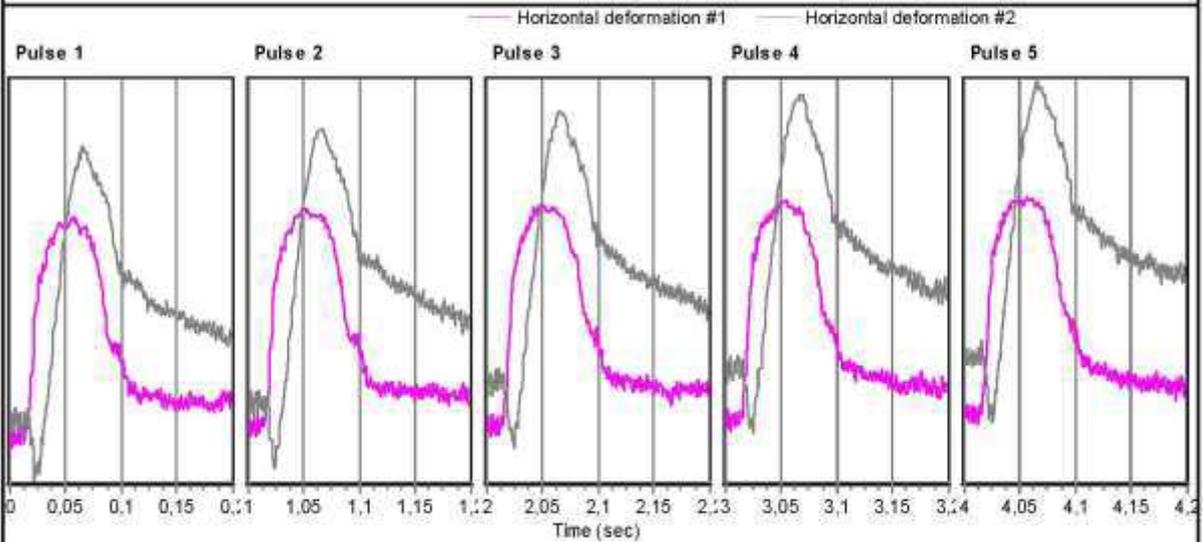
Test date & time: segunda-feira, novembro 30, 2015, at 16:23

Conditioning pulses: 5

Core temperature (°C): 29.4

Surface temperature (°C): 29.4

QRTestResultsTitle	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	4744	4647	4631	4535	4493	4610	88,26	1,91
Modulus of loading (MPa)	3235	3208	3278	3248	3249	3243	22,76	0,70
Instantaneous horizontal deformation (µm)	1.915	1.957	1.966	2.005	2.028	1.974	0,04	1,98
Horizontal loading deformation (µm)	2.809	2.834	2.778	2.800	2.805	2.805	0,02	0,65
Maximum load (N)	1105	1105	1105	1105	1107	1105	0,89	0,08
Cyclic load (N)	1052	1053	1054	1053	1055	1053	1,12	0,11
Contact load (N)	53	53	50	52	52	52	0,84	1,61



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian: NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load  
 Data file name: D:\Meus documentos\Danie\NS 5070 cp2 br.D003  
 Template file: C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Templates\db123.P003  
 Project:  
 Operator:  
 Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25  
 Waveshape: Haversine  
 Loading pulse width (ms): 100  
 Rest period (ms): 900  
 Pulse repetition period (ms): 1000  
 Number of conditioning pulses: 5  
 Contact load (N): 50  
 Cyclic load (N): 1055  
 Estimated Poisson's ratio: 0.3

### Specimen Information

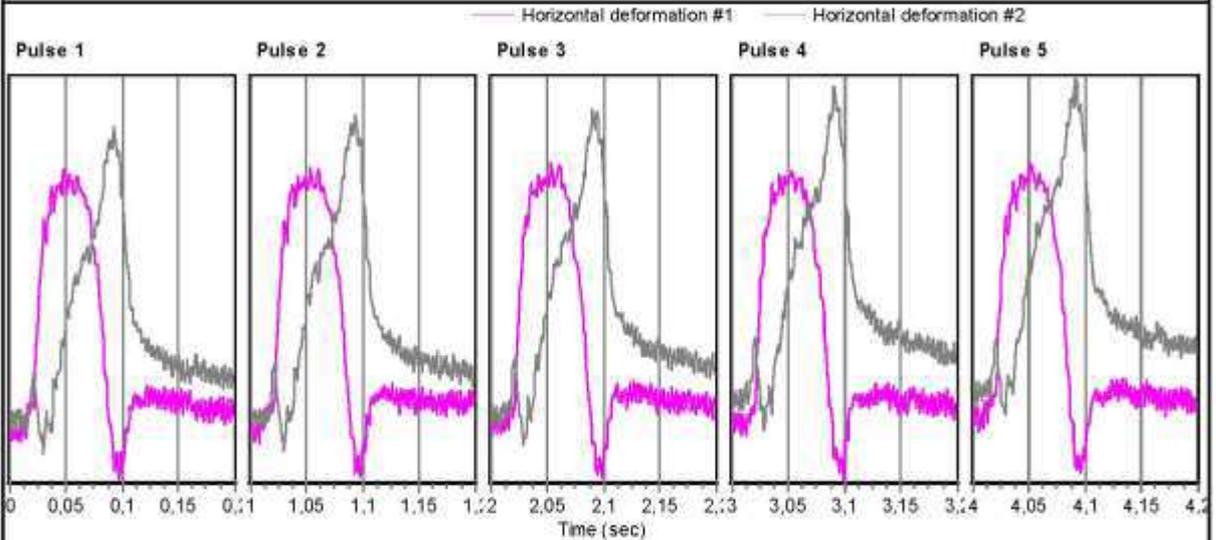
Identification:  
 Conditioning time:  
 Properties/Comments:

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Diameter (mm)	101,0						101,0	
Height (mm)	66,0						66,0	
Cross-sectional area (mm <sup>2</sup> ): 8011,8								

### Test Results

Test date & time: segunda-feira, novembro 30, 2015, at 16:41  
 Conditioning pulses: 5  
 Core temperature (°C): 29,4  
 Surface temperature (°C): 29,4

QRTestResultsTitle	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	5094	4975	4797	4693	4631	4838	173,39	3,58
Modulus of loading (MPa)	3817	3802	3706	3686	3731	3748	51,93	1,39
Instantaneous horizontal deformation (µm)	1,786	1,834	1,898	1,942	1,966	1,885	0,07	3,55
Horizontal loading deformation (µm)	2,384	2,401	2,457	2,472	2,441	2,431	0,03	1,38
Maximum load (N)	1106	1106	1103	1105	1105	1105	1,14	0,10
Cyclic load (N)	1054	1057	1054	1055	1054	1055	1,03	0,10
Contact load (N)	53	50	49	50	50	50	1,28	2,54



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian: NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load  
 Data file name: D:\Meus documentos\Daniel\5070 OM cp3 br.D003  
 Template file: C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Templates\db123.P003  
 Project:  
 Operator:  
 Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25  
 Waveshape: Haversine  
 Loading pulse width (ms): 100  
 Rest period (ms): 900  
 Pulse repetition period (ms): 1000

Number of conditioning pulses: 5  
 Contact load (N): 40  
 Cyclic load (N): 700  
 Estimated Poisson's ratio: 0.3

### Specimen Information

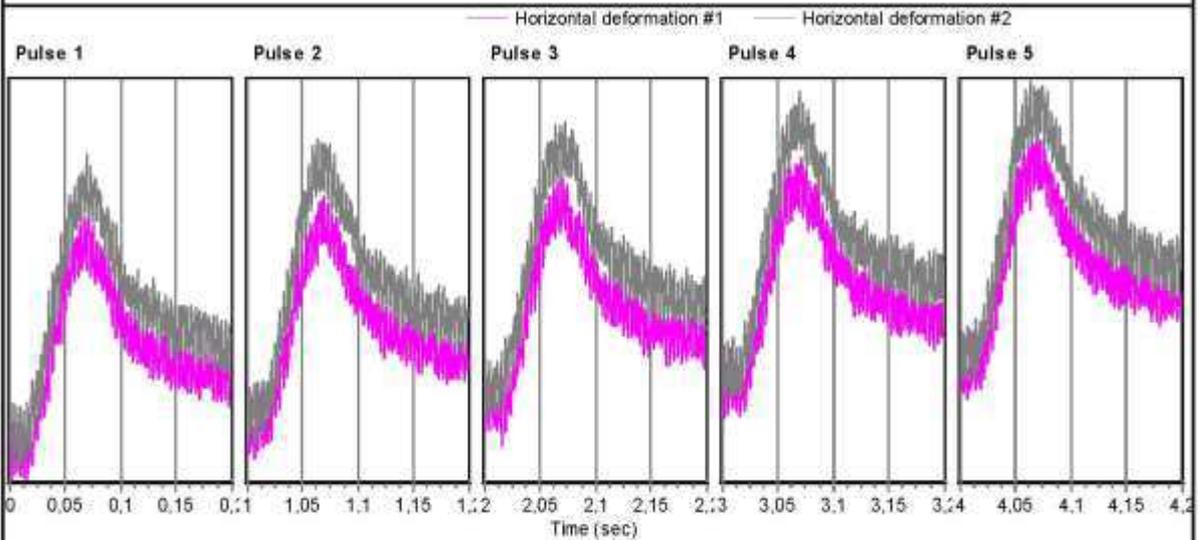
Identification:  
 Conditioning time:  
 Properties/Comments:

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Diameter (mm)	102,0						102,0	
Height (mm)	66,0						66,0	
Cross-sectional area (mm <sup>2</sup> ): 8171,3								

### Test Results

Test date & time: sexta-feira, dezembro 4, 2015, at 09:34  
 Conditioning pulses: 5  
 Core temperature (°C): 29,4  
 Surface temperature (°C): 29,4

QRTestResultsTitle	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	5027	4962	4861	4883	4917	4930	59,47	1,21
Modulus of loading (MPa)	2883	2931	2988	2884	2944	2926	39,42	1,35
Instantaneous horizontal deformation (µm)	1,203	1,218	1,240	1,237	1,229	1,225	0,01	1,11
Horizontal loading deformation (µm)	2,098	2,062	2,018	2,095	2,053	2,065	0,03	1,43
Maximum load (N)	742	741	739	740	742	741	1,31	0,18
Cyclic load (N)	700	700	698	700	700	699	0,75	0,11
Contact load (N)	42	41	40	40	42	41	0,68	1,66



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian: NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load  
 Data file name: D:\Meus documentos\Daniel\SS070 OM cp1 brazilian.D003  
 Template file: C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Templates\db123.P003  
 Project:  
 Operator:  
 Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25  
 Waveshape: Haversine  
 Loading pulse width (ms): 100  
 Rest period (ms): 900  
 Pulse repetition period (ms): 1000

Number of conditioning pulses: 5  
 Contact load (N): 40  
 Cyclic load (N): 700  
 Estimated Poisson's ratio: 0.3

### Specimen Information

Identification:  
 Conditioning time:  
 Properties/Comments:

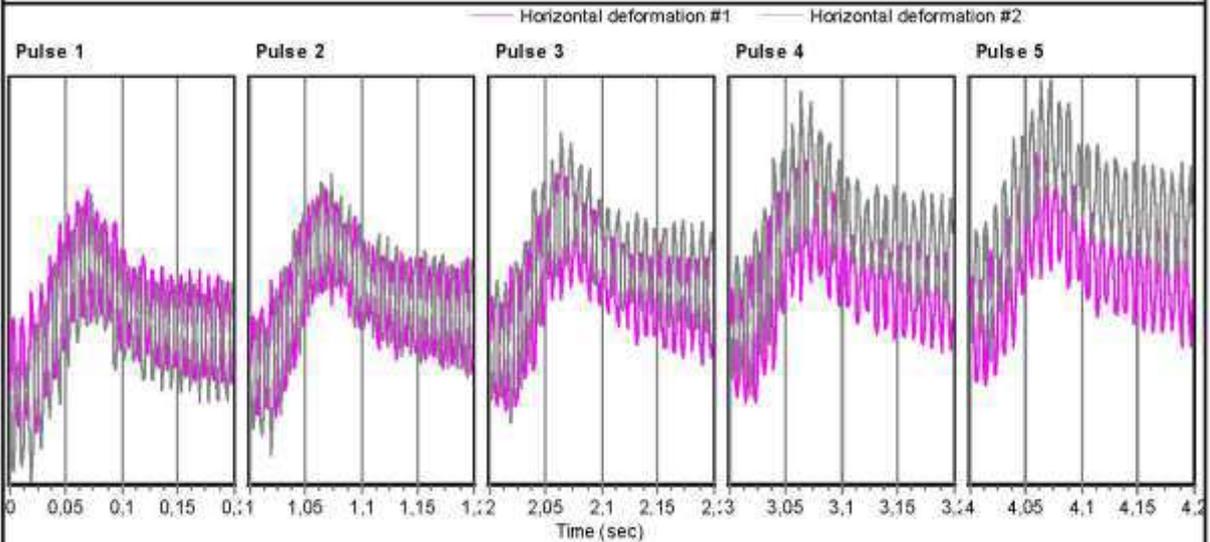
Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Diameter (mm)	100,0						100,0	
Height (mm)	66,0						66,0	

Cross-sectional area (mm<sup>2</sup>): 7854,0

### Test Results

Test date & time: quinta-feira, dezembro 3, 2015, at 10:00  
 Conditioning pulses: 5  
 Core temperature (°C): 29,4  
 Surface temperature (°C): 29,4

QRTestResultsTitle	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	5415	5502	5452	5207	5348	5385	102,17	1,90
Modulus of loading (MPa)	2926	2968	3053	2911	2929	2957	51,16	1,73
Instantaneous horizontal deformation (µm)	1,107	1,095	1,108	1,158	1,126	1,119	0,02	1,96
Horizontal loading deformation (µm)	2,049	2,029	1,979	2,071	2,056	2,037	0,03	1,56
Maximum load (N)	738	741	741	739	738	739	1,40	0,19
Cyclic load (N)	694	697	700	698	697	697	1,74	0,25
Contact load (N)	43	43	41	40	40	42	1,40	3,34



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian: NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load

Data file name: D:\Meus documentos\Daniel\5 5070 OL cp1 br.D003

Template file: C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Templates\db123.P003

Project:

Operator:

Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25	Number of conditioning pulses: 5
Waveshape: Haversine	Contact load (N): 56
Loading pulse width (ms): 100	Cyclic load (N): 700
Rest period (ms): 900	Estimated Poisson's ratio: 0.3
Pulse repetition period (ms): 1000	

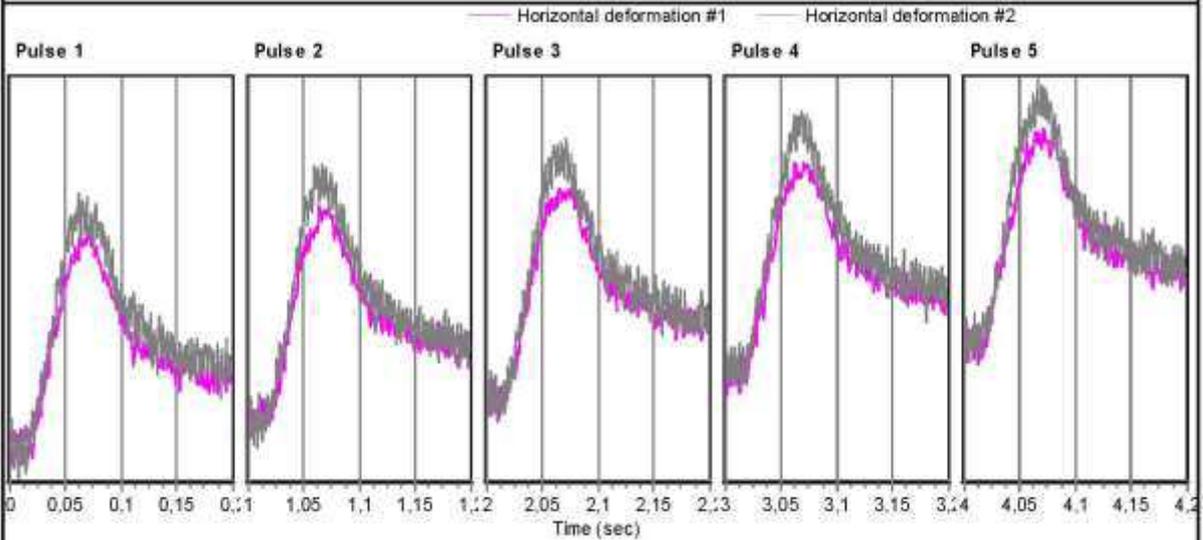
### Specimen Information

Identification:	Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Conditioning time:	Diameter (mm)	100,0						100,0	
Properties/Comments:	Height (mm)	65,0						65,0	
		Cross-sectional area (mm <sup>2</sup> ): 7954,0							

### Test Results

Test date & time: quinta-feira, dezembro 3, 2015, at 11:08  
 Conditioning pulses: 5  
 Core temperature (°C): 29.4  
 Surface temperature (°C): 29.4

QRTestResultsTitle	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	6160	6206	6234	6068	6061	6146	70,58	1,15
Modulus of loading (MPa)	3769	3756	3955	3830	3744	3811	78,17	2,05
Instantaneous horizontal deformation (µm)	0,997	0,989	0,985	1,008	1,013	0,998	0,01	1,08
Horizontal loading deformation (µm)	1,630	1,633	1,553	1,597	1,641	1,611	0,03	2,03
Maximum load (N)	758	756	758	754	758	757	1,63	0,22
Cyclic load (N)	700	700	700	697	700	700	1,18	0,17
Contact load (N)	57	56	57	56	58	57	0,57	1,00



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian: NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load

Data file name: D:\Meus documentos\Daniel\5070 OL cp2 br D003

Template file: C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Templates\db123.P003

Project:

Operator:

Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25	Number of conditioning pulses: 5
Waveshape: Haversine	Contact load (N): 56
Loading pulse width (ms): 100	Cyclic load (N): 700
Rest period (ms): 900	Estimated Poisson's ratio: 0.3
Pulse repetition period (ms): 1000	

### Specimen Information

Identification:	Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Conditioning time:	Diameter (mm)	100,0						100,0	
Properties/Comments:	Height (mm)	65,0						65,0	
		Cross-sectional area (mm <sup>2</sup> ): 7854,0							

### Test Results

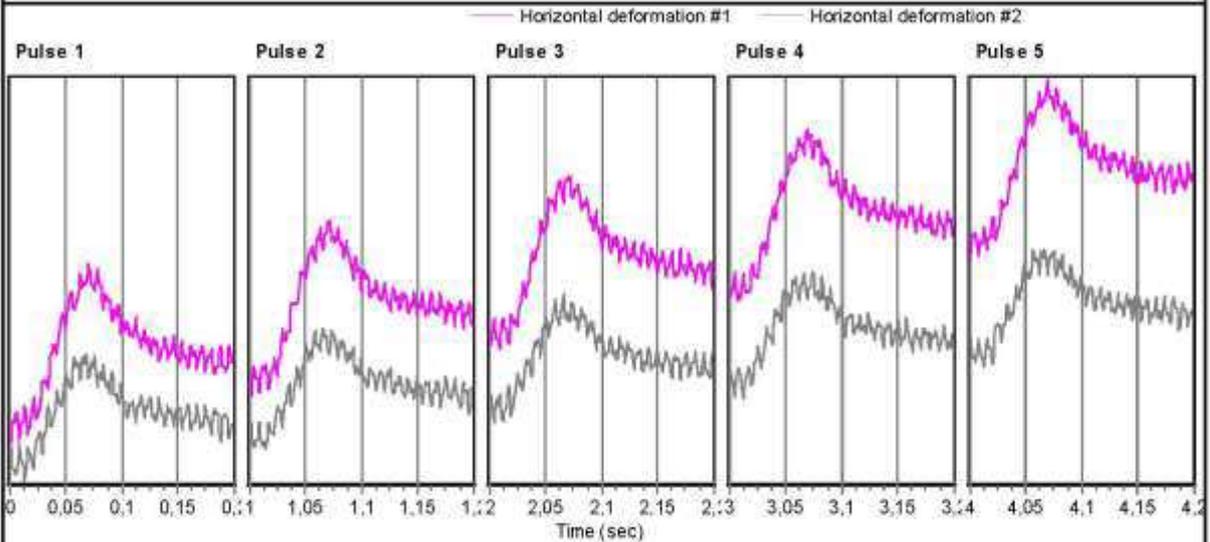
Test date & time: quinta-feira, dezembro 3, 2015, at 11:21

Conditioning pulses: 5

Core temperature (°C): 29,4

Surface temperature (°C): 29,4

QRTestResultsTitle	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	5382	5464	5396	5413	5440	5419	29,74	0,55
Modulus of loading (MPa)	2939	2931	2967	2908	2963	2941	21,69	0,74
Instantaneous horizontal deformation (µm)	1,145	1,126	1,134	1,127	1,129	1,132	0,01	0,61
Horizontal loading deformation (µm)	2,097	2,100	2,064	2,098	2,073	2,086	0,02	0,73
Maximum load (N)	758	758	755	753	758	757	2,18	0,29
Cyclic load (N)	703	702	698	696	700	700	2,53	0,36
Contact load (N)	56	56	57	57	58	57	0,78	1,37



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian: NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load

Data file name D:\Meus documentos\Daniel\5 5575 cp1 br.D003

Template file C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\db123.P003

Project:

Operator:

Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25  
 Waveshape: Haversine  
 Loading pulse width (ms): 100  
 Rest period (ms): 900  
 Pulse repetition period (ms): 1000

Number of conditioning pulses: 5  
 Contact load (N): 40  
 Cyclic load (N): 1180  
 Estimated Poisson's ratio: 0.3

### Specimen Information

Identification:  
 Conditioning time:  
 Properties/Comments:

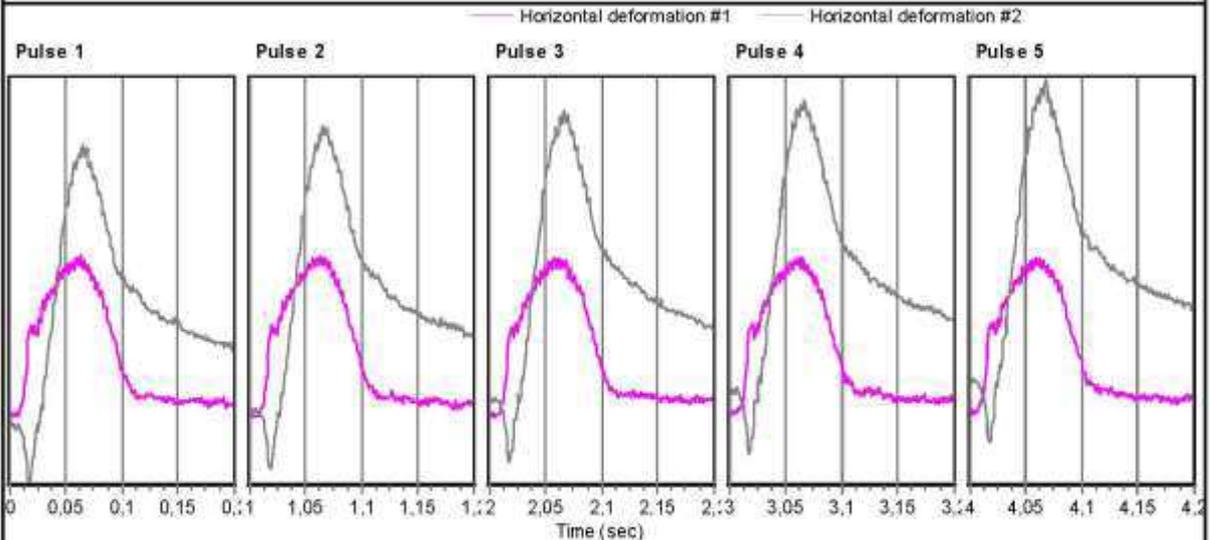
Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Diameter (mm)	100,0						100,0	
Height (mm)	65,0						65,0	

Cross-sectional area (mm<sup>2</sup>): 7854,0

### Test Results

Test date & time: segunda-feira, novembro 30, 2015, at 16:53  
 Conditioning pulses: 5  
 Core temperature (°C): 29,4  
 Surface temperature (°C): 29,4

QRTestResultsTitle	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	3470	3275	3249	3199	3155	3270	108,52	3,32
Modulus of loading (MPa)	2403	2352	2335	2362	2307	2352	31,49	1,34
Instantaneous horizontal deformation (µm)	2,980	3,160	3,186	3,246	3,274	3,169	0,10	3,24
Horizontal loading deformation (µm)	4,305	4,400	4,433	4,396	4,477	4,402	0,06	1,29
Maximum load (N)	1221	1224	1221	1224	1219	1222	1,83	0,15
Cyclic load (N)	1180	1180	1180	1184	1178	1180	2,01	0,17
Contact load (N)	41	43	40	40	41	41	1,28	3,10



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian; NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load  
 Data file name: D:\Meus documentos\Daniel\5 5575 cp2 br.D003  
 Template file: C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Templates\db123.P003  
 Project:  
 Operator:  
 Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25  
 Waveshape: Haversine  
 Loading pulse width (ms): 100  
 Rest period (ms): 900  
 Pulse repetition period (ms): 1000  
 Number of conditioning pulses: 5  
 Contact load (N): 40  
 Cyclic load (N): 1080  
 Estimated Poisson's ratio: 0.3

### Specimen Information

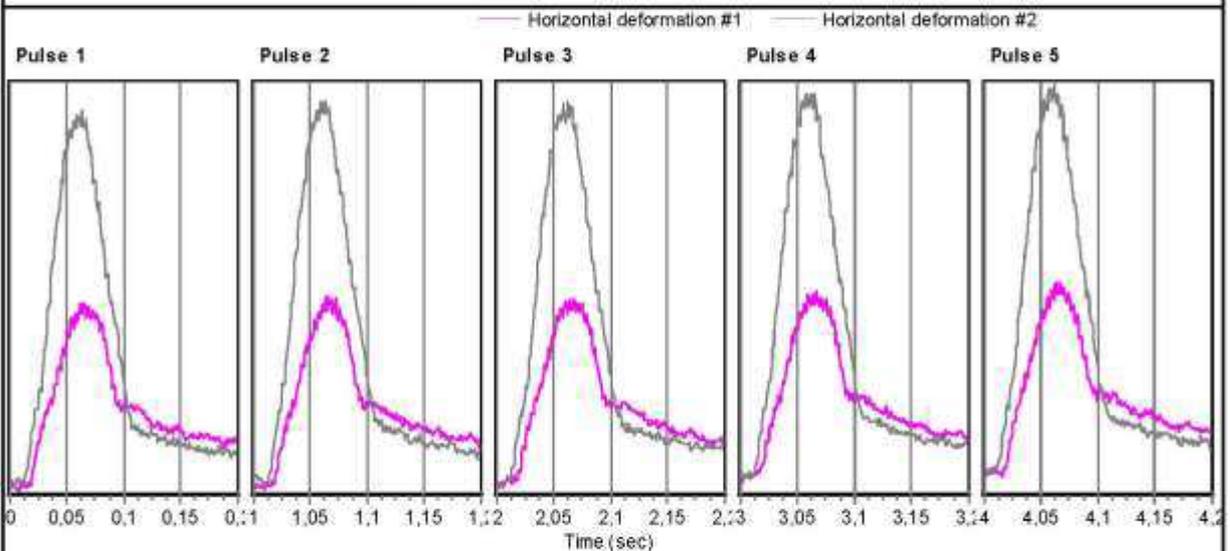
Identification:  
 Conditioning time:  
 Properties/Comments:

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Diameter (mm)	100,0						100,0	
Height (mm)	65,0						65,0	
							Cross-sectional area (mm <sup>2</sup> ):	7854,0

### Test Results

Test date & time: segunda-feira, novembro 30, 2015, at 17:05  
 Conditioning pulses: 5  
 Core temperature (°C): 29,4  
 Surface temperature (°C): 29,4

OR Test Results Title	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	2918	2879	2809	2776	2702	2817	76,24	2,71
Modulus of loading (MPa)	2272	2250	2224	2213	2192	2230	28,02	1,28
Instantaneous horizontal deformation (µm)	3,228	3,295	3,373	3,405	3,499	3,360	0,09	2,76
Horizontal loading deformation (µm)	4,146	4,217	4,259	4,272	4,312	4,241	0,06	1,34
Maximum load (N)	1118	1121	1119	1118	1122	1120	1,42	0,13
Cyclic load (N)	1074	1082	1080	1078	1078	1078	2,58	0,24
Contact load (N)	43	39	39	40	43	41	2,07	5,04



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian: NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load  
 Data file name: D:\Meus documentos\Daniel\5 5575 OM cp3 br.D003  
 Template file: C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Templates\db123.P003  
 Project:  
 Operator:  
 Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25  
 Waveshape: Haversine  
 Loading pulse width (ms): 100  
 Rest period (ms): 900  
 Pulse repetition period (ms): 1000

Number of conditioning pulses: 5  
 Contact load (N): 34  
 Cyclic load (N): 780  
 Estimated Poisson's ratio: 0.3

### Specimen Information

Identification:  
 Conditioning time:  
 Properties/Comments:

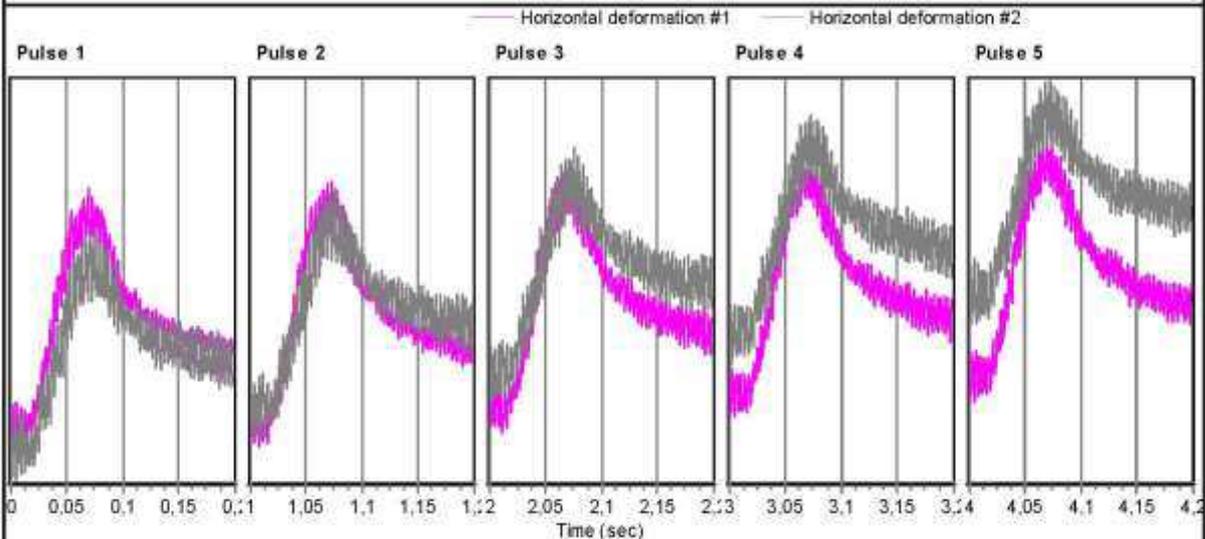
Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Diameter (mm)	102,0						102,0	
Height (mm)	66,0						66,0	

Cross-sectional area (mm<sup>2</sup>): 8171,3

### Test Results

Test date & time: sexta-feira, dezembro 4, 2015, at 09:42  
 Conditioning pulses: 5  
 Core temperature (°C): 29,4  
 Surface temperature (°C): 29,4

QRTestResultsTitle	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	3964	3847	3747	3660	3706	3785	108,73	2,87
Modulus of loading (MPa)	2135	2133	2136	2115	2132	2130	7,76	0,36
Instantaneous horizontal deformation (µm)	1,701	1,757	1,793	1,838	1,812	1,780	0,05	2,68
Horizontal loading deformation (µm)	3,157	3,170	3,146	3,181	3,149	3,160	0,01	0,41
Maximum load (N)	814	815	811	815	815	814	1,48	0,18
Cyclic load (N)	780	783	778	779	777	780	1,89	0,24
Contact load (N)	34	32	33	36	37	34	1,99	5,79



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian; NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load

Data file name D:\Meus documentos\DanielS 5575 OM cp4 br.D003

Template file C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\db123.P003

Project:

Operator:

Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25  
 Waveshape: Haversine  
 Loading pulse width (ms): 100  
 Rest period (ms): 900  
 Pulse repetition period (ms): 1000

Number of conditioning pulses: 5  
 Contact load (N): 34  
 Cyclic load (N): 780  
 Estimated Poisson's ratio: 0.3

### Specimen Information

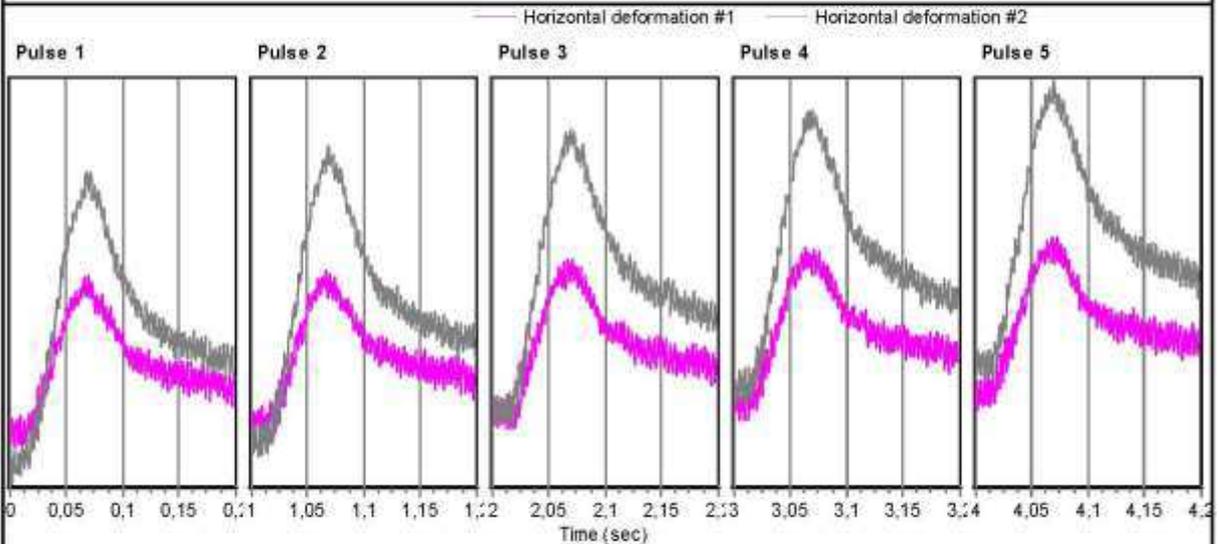
Identification:  
 Conditioning time:  
 Properties/Comments:

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Diameter (mm)	102,0						102,0	
Height (mm)	66,0						66,0	
							Cross-sectional area (mm <sup>2</sup> ):	8171,3

### Test Results

Test date & time: sexta-feira, dezembro 4, 2015, at 09:49  
 Conditioning pulses: 5  
 Core temperature (°C): 29,4  
 Surface temperature (°C): 29,4

QRTestResultsTitle	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	4536	4550	4543	4586	4486	4541	32,24	0,71
Modulus of loading (MPa)	2694	2707	2779	2781	2772	2747	38,00	1,38
Instantaneous horizontal deformation (µm)	1,483	1,478	1,479	1,467	1,498	1,481	0,01	0,68
Horizontal loading deformation (µm)	2,498	2,485	2,419	2,419	2,424	2,449	0,03	1,42
Maximum load (N)	814	813	813	816	814	814	1,01	0,12
Cyclic load (N)	779	779	778	779	778	779	0,37	0,05
Contact load (N)	35	34	35	37	36	35	1,01	2,87



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian; NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load  
 Data file name: D:\Meus documentos\Daniel\5 5575 OL cp1 br.D003  
 Template file: C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Templates\vb123.P003  
 Project:  
 Operator:  
 Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25  
 Waveshape: Haversine  
 Loading pulse width (ms): 100  
 Rest period (ms): 900  
 Pulse repetition period (ms): 1000  
 Number of conditioning pulses: 5  
 Contact load (N): 51  
 Cyclic load (N): 620  
 Estimated Poisson's ratio: 0.3

### Specimen Information

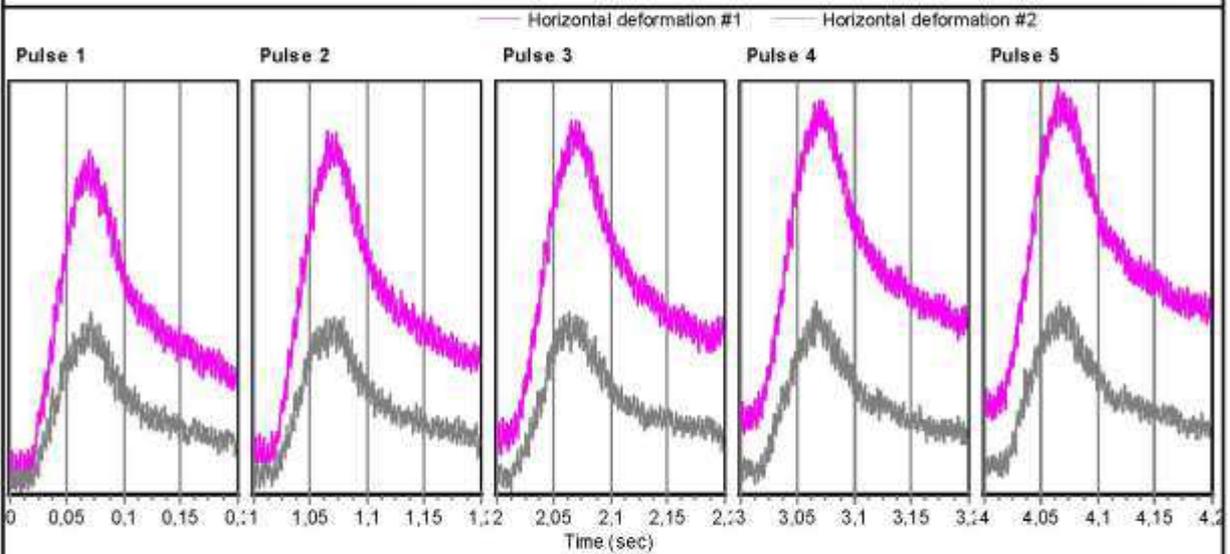
Identification:  
 Conditioning time:  
 Properties/Comments:

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Diameter (mm)	100,0						100,0	
Height (mm)	66,0						66,0	
							Cross-sectional area (mm <sup>2</sup> ):	7854,0

### Test Results

Test date & time: quinta-feira, dezembro 3, 2015, at 11:41  
 Conditioning pulses: 5  
 Core temperature (°C): 29,4  
 Surface temperature (°C): 29,4

OR Test Results Title	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	3437	3353	3346	3199	3350	3337	76,61	2,30
Modulus of loading (MPa)	2066	2056	2071	2022	2125	2068	33,16	1,60
Instantaneous horizontal deformation (µm)	1,559	1,595	1,599	1,670	1,603	1,605	0,04	2,25
Horizontal loading deformation (µm)	2,593	2,602	2,584	2,642	2,527	2,569	0,04	1,43
Maximum load (N)	670	671	671	672	674	672	1,50	0,22
Cyclic load (N)	620	620	620	619	622	620	1,03	0,17
Contact load (N)	50	52	52	53	53	52	1,28	2,46



## UTS003 2.00 (Beta Release 24NOV2015) Indirect Tensile Modulus Test

Test method: Brazilian; NBR16018 Asphalt Mixtures - Determination of stiffness by diametrical compression under repeated load

Data file name D:\Meus documentos\Daniele\5575 OL cp2 br.D003

Template file C:\IPCglobal\UTS\003 IT Modulus Test\Templates\db123.P003

Project:

Operator:

Comments:

### Setup Parameters

Target temperature (°C): 25  
 Waveshape: Haversine  
 Loading pulse width (ms): 100  
 Rest period (ms): 900  
 Pulse repetition period (ms): 1000

Number of conditioning pulses: 50  
 Contact load (N): 31  
 Cyclic load (N): 640  
 Estimated Poisson's ratio: 0.3

### Specimen Information

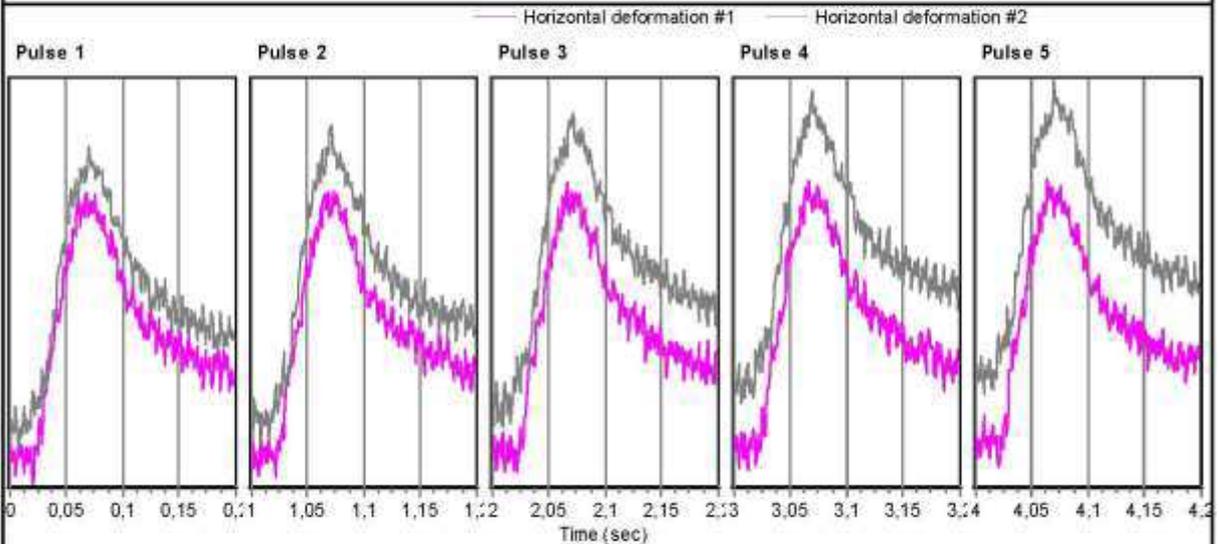
Identification:  
 Conditioning time:  
 Properties/Comments:

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std. Dev.
Diameter (mm)	100,0						100,0	
Height (mm)	66,0						66,0	
							Cross-sectional area (mm <sup>2</sup> ): 7854,0	

### Test Results

Test date & time: quinta-feira, dezembro 3, 2015, at 11:46  
 Conditioning pulses: 50  
 Core temperature (°C): 29,4  
 Surface temperature (°C): 29,4

QRTestResultsTitle	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Instantaneous Resilient Modulus (MPa)	3792	3437	3371	3385	3453	3488	155,50	4,46
Modulus of loading (MPa)	2020	1967	1966	2012	2025	1998	26,06	1,30
Instantaneous horizontal deformation (µm)	1,456	1,606	1,638	1,631	1,599	1,586	0,07	4,21
Horizontal loading deformation (µm)	2,734	2,807	2,809	2,745	2,726	2,764	0,04	1,31
Maximum load (N)	669	670	671	671	672	671	1,12	0,17
Cyclic load (N)	639	639	639	639	639	639	0,00	0,00
Contact load (N)	30	31	32	32	33	31	1,12	3,57



**ANEXO IV – ENSAIO DE FADIGA A TENSÃO CONTROLADA.**

## ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra: Tese Fabiano - Mistura Asfáltica CAP 50/70 (Marshall)      Protocolo:  

Temperatura de ensaio: 25 °C      Operador(es): Daniel

Módulo resiliente inst. médio da amostra: 6801 MPa      Inressado: Fabiano

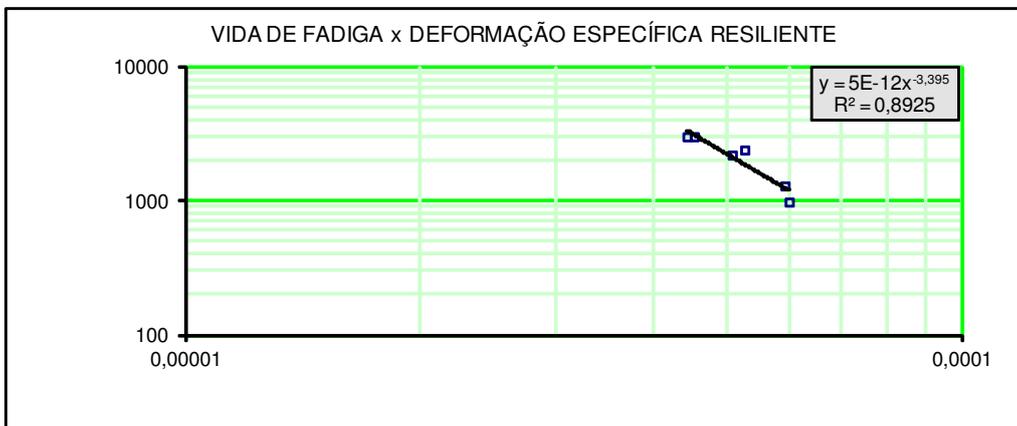
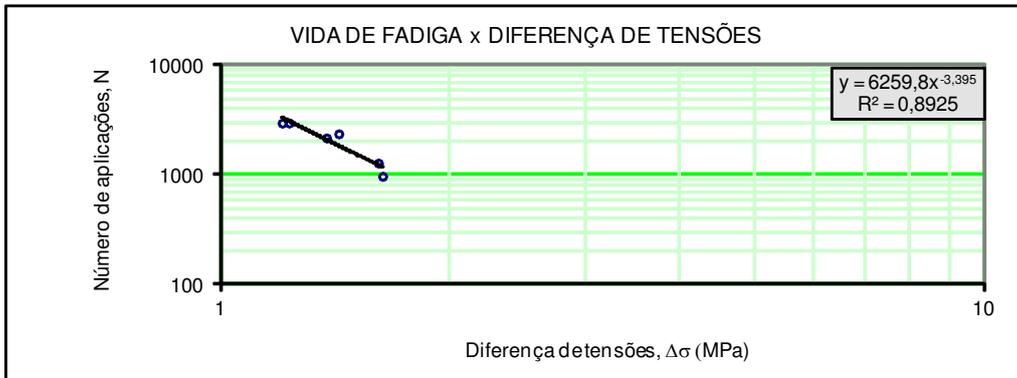
Tensão de tração estática máxima,  $\sigma_{Tmax}$ : 1,16 MPa      Data: 4-jan-16

Equação do cil. de carga ( 4 pol ): 

$$P_{m(0-10)} = 0,0128F + 0,0163$$

$$F_{(0-10)} = 78,295Pm - 1,2442$$

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm <sup>2</sup> )	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
1	6,59	10,18	25	273,8		0,0000375	1,02	38011
2	6,70	10,17	30	328,5		0,0000442	1,20	3006
3	6,52	10,23	30	328,5		0,0000452	1,23	3011
4	6,79	10,24	35	383,3		0,0000506	1,38	2201
5	6,55	10,23	35	383,3		0,0000525	1,43	2396
6	6,59	10,18	40	438,0		0,0000599	1,63	981
7	6,63	10,25	40	438,0		0,0000591	1,61	1296



F001-2001

## ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra:  Protocolo:

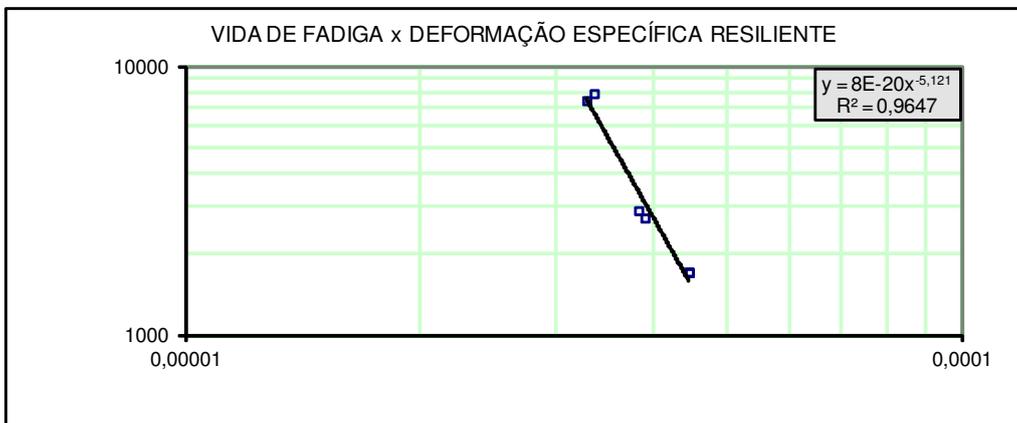
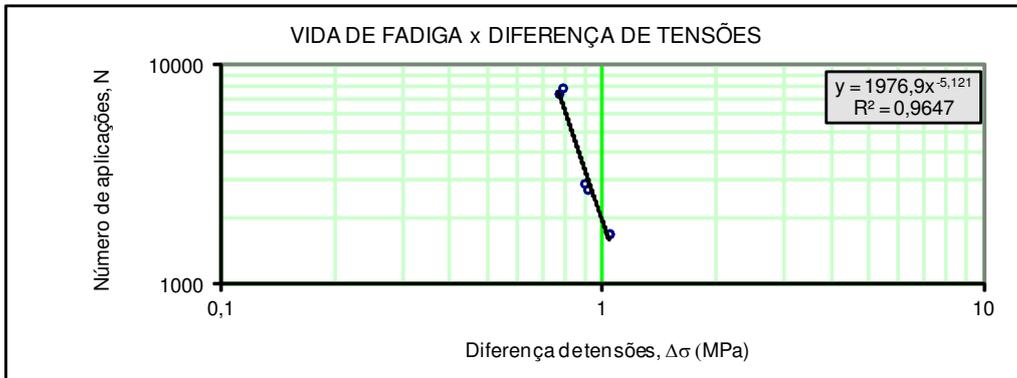
Temperatura de ensaio:  °C Operador(es):

Módulo resiliente inst. médio da amostra:  MPa Inressado:

Tensão de tração estática máxima,  $\sigma_{Tmax}$ :  MPa Data:

Equação do cil. de carga ( 4 pol):  $P_{m(0-10)} = 0,0128F + 0,0163$   
 $F_{(0-10)} = 78,295Pm - 1,2442$

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm <sup>2</sup> )	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
1	6,65	10,18	30	208,7		0,0000329	0,77	7471
2	6,46	10,25	30	208,7		0,0000336	0,79	7936
3	6,65	10,18	35	243,4		0,0000383	0,90	2911
4	6,50	10,22	35	243,4		0,0000391	0,91	2731
5	6,54	10,18	40	278,2		0,0000445	1,04	1711
6	6,53	10,20	40	278,2		0,0000445	1,04	1721



F001-2001

## ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra:  Protocolo:

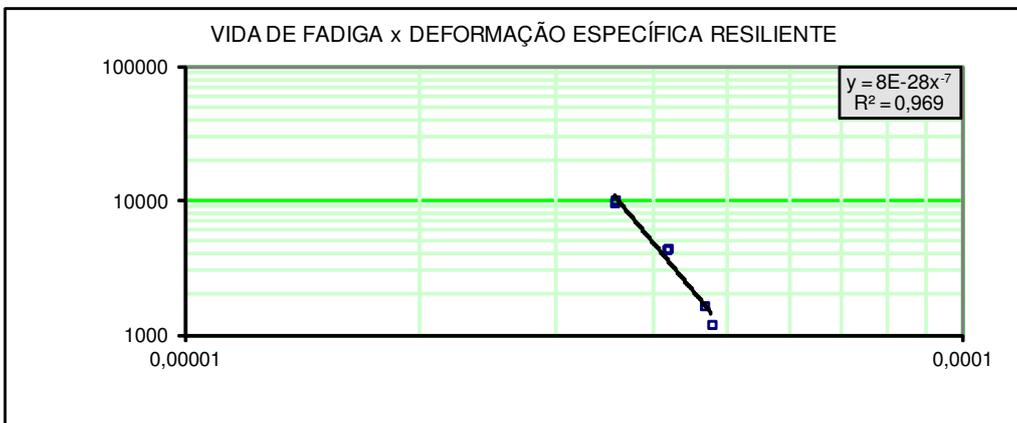
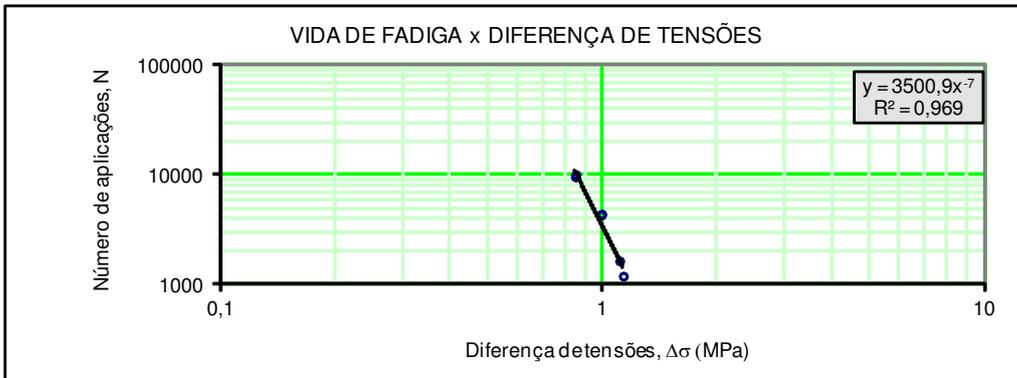
Temperatura de ensaio:  °C Operador(es):

Módulo resiliente inst. médio da amostra:  MPa Inressado:

Tensão de tração estática máxima,  $\sigma_{Tmax}$ :  MPa Data:

Equação do cil. de carga ( 4 pol):  $P_{m(0-10)} = 0,028F + 0,0163$   
 $F_{(0-10)} = 78,295Pm - 1,2442$

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm <sup>2</sup> )	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
1	6,42	10,20	30	223,5		0,0000358	0,85	10191
2	6,46	10,16	30	223,5		0,0000357	0,85	9711
3	6,44	10,19	35	260,8		0,0000416	0,99	4346
4	6,39	10,23	35	260,8		0,0000418	1,00	4441
5	6,45	10,17	40	298,0		0,0000476	1,13	1206
6	6,60	10,16	40	298,0		0,0000466	1,11	1661



F001-2001

## ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra: Tese Fabiano - Mistura Asfáltica CAP 50/70 (Superpave)      Protocolo:  

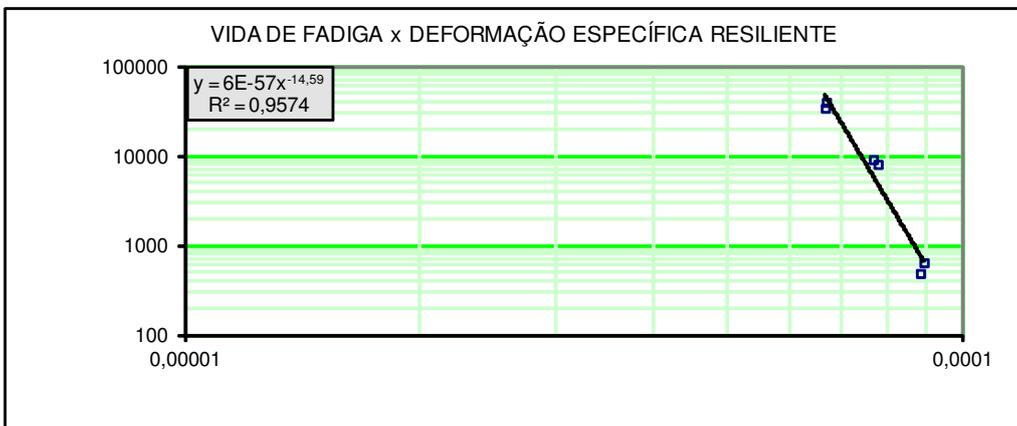
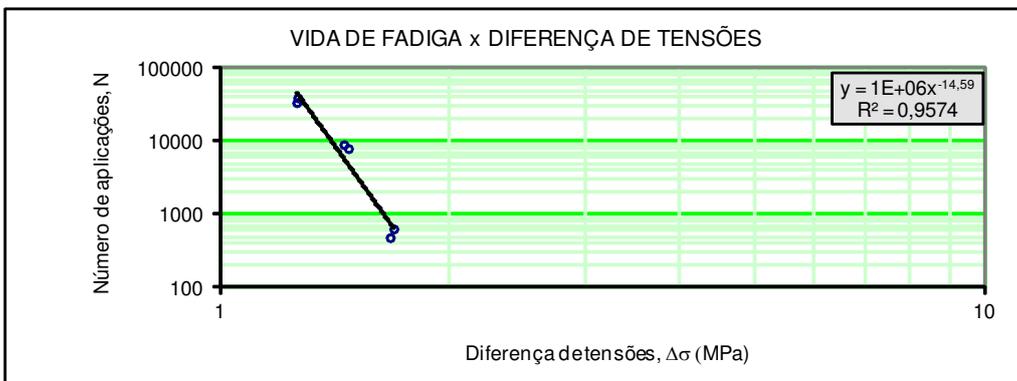
Temperatura de ensaio: 25 °C      Operador(es): Daniel

Módulo resiliente inst. médio da amostra: 4724 MPa      Inressado: Fabiano

Tensão de tração estática máxima,  $\sigma_{Tmax}$ : 1,17 MPa      Data: 4-jan-16

Equação do cil. de carga (4 pol):  $Pm_{(n-1m)} = 0,0128F + 0,0163$   
 $F_{(0-10)} = 78,295Pm - 1,2442$

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm <sup>2</sup> )	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
1	6,57	10,00	30	331,4		0,0000666	1,26	34386
2	6,55	10,00	30	331,4		0,0000668	1,26	39986
3	6,65	10,00	35	386,6		0,0000768	1,45	9171
4	6,56	10,00	35	386,6		0,0000779	1,47	8101
5	6,61	10,00	40	441,8		0,0000883	1,67	491
6	6,54	10,00	40	441,8		0,0000893	1,69	646



F001-2001



## ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra:  Protocolo:

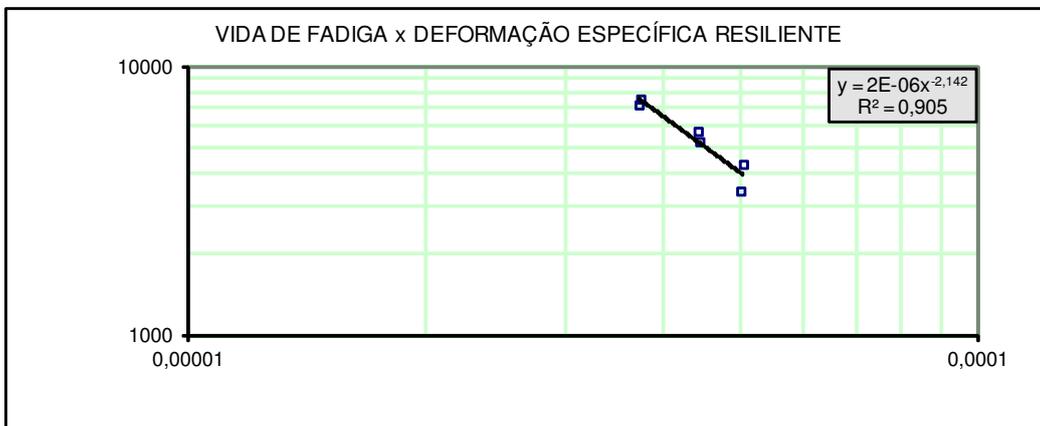
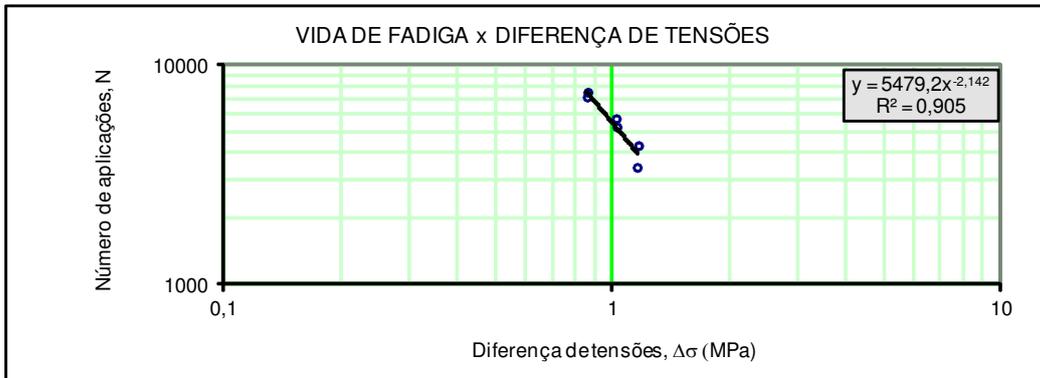
Temperatura de ensaio:  °C Operador(es):

Módulo resiliente inst. médio da amostra:  MPa Inressado:

Tensão de tração estática máxima,  $\sigma_{Tmax}$ :  MPa Data:

Equação do cil. de carga ( 4 pol):  $P_{m(0-10)} = 0,0128F + 0,0163$   
 $F_{(0-10)} = 78,295Pm - 1,2442$

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm <sup>2</sup> )	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
1	6,59	10,00	30	227,9		0,0000373	0,86	7576
2	6,62	10,00	30	227,9		0,0000372	0,86	7206
3	6,50	10,00	35	265,8		0,0000441	1,02	5741
4	6,47	10,00	35	265,8		0,0000444	1,03	5261
5	6,56	10,00	40	303,8		0,0000500	1,16	3441
6	6,51	10,00	40	303,8		0,0000504	1,17	4326



F001-2001

## ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra:  Protocolo:

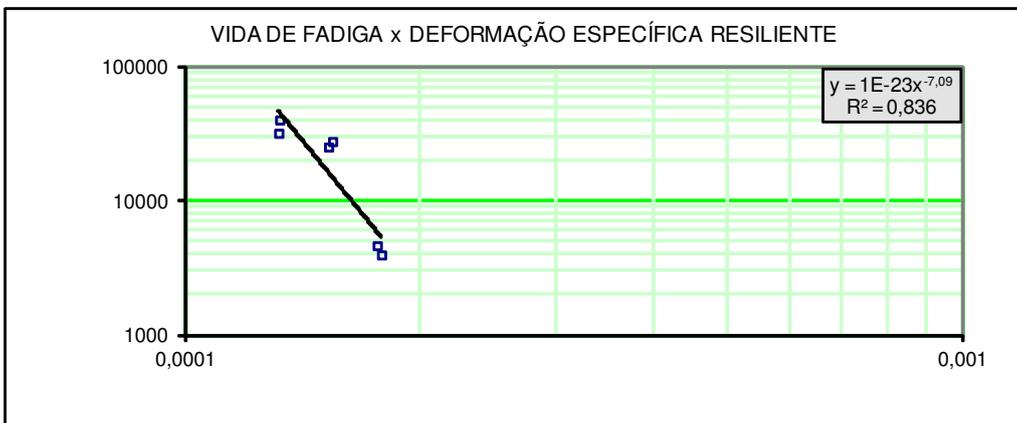
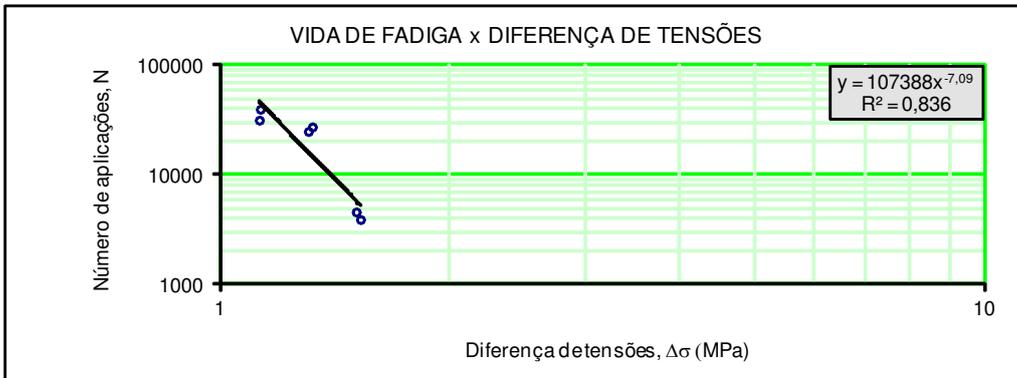
Temperatura de ensaio:  °C Operador(es):

Módulo resiliente inst. médio da amostra:  MPa Inressado:

Tensão de tração estática máxima,  $\sigma_{Tmax}$ :  MPa Data:

Equação do cil. de carga ( 4 pol ):  $P_{m(0-10)} = 0,028F + 0,0163$   
 $F_{(0-10)} = 78,295Pm - 1,2442$

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm <sup>2</sup> )	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
1	6,59	10,17	30	302,0		0,0001319	1,12	31926
2	6,57	10,17	30	302,0		0,0001323	1,13	40131
3	6,60	10,22	35	352,3		0,0001529	1,30	25216
4	6,47	10,30	35	352,3		0,0001548	1,32	27716
5	6,51	10,25	40	402,6		0,0001766	1,51	4646
6	6,39	10,31	40	402,6		0,0001789	1,53	3966



F001-2001

## ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra:  Protocolo:

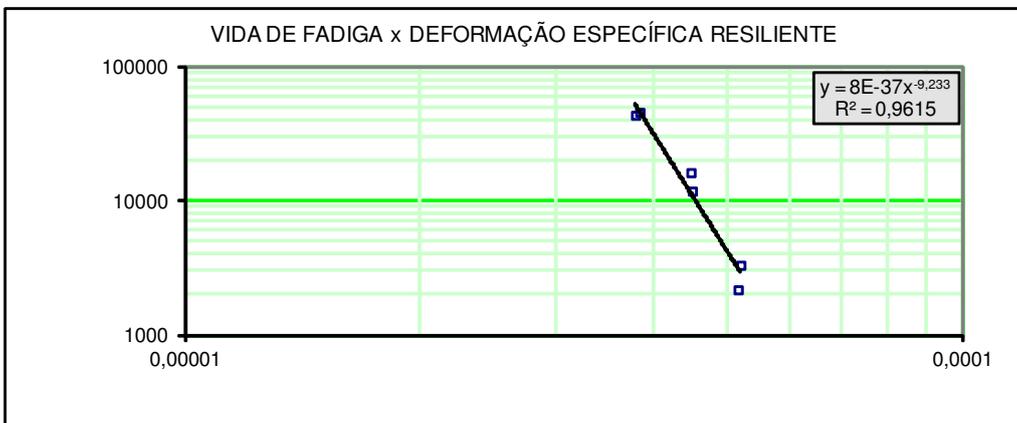
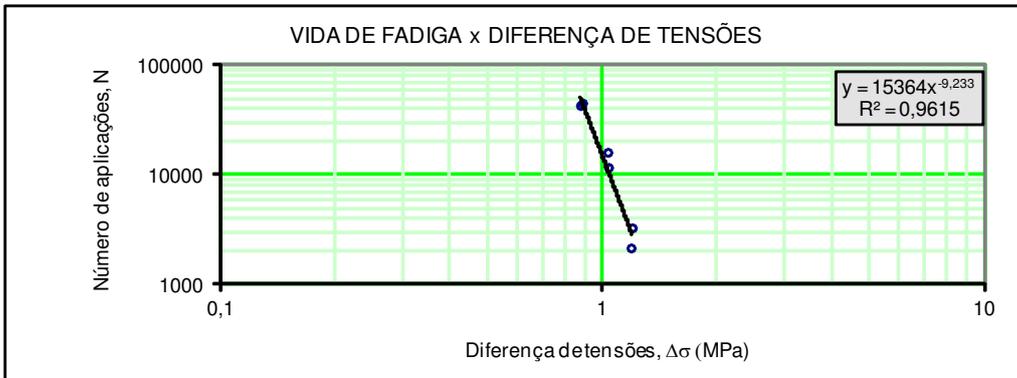
Temperatura de ensaio:  °C Operador(es):

Módulo resiliente inst. médio da amostra:  MPa Inressado:

Tensão de tração estática máxima,  $\sigma_{Tmax}$ :  MPa Data:

Equação do cil. de carga ( 4 pol ):  $P_{m(0-10)} = 0,028F + 0,0163$   
 $F_{(0-10)} = 78,295Pm - 1,2442$

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm <sup>2</sup> )	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
1	6,42	10,24	30	233,7		0,0000385	0,89	45661
2	6,54	10,18	30	233,7		0,0000380	0,88	43441
3	6,47	10,19	35	272,7		0,0000447	1,03	16251
4	6,45	10,18	35	272,7		0,0000449	1,04	11836
5	6,39	10,25	40	311,6		0,0000515	1,19	2181
6	6,39	10,17	40	311,6		0,0000519	1,20	3326



F001-2001

## ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra: Tese Fabiano - Mistura Asfáltica CAP 55/75 + 5% de OL (Superpave) Protocolo:

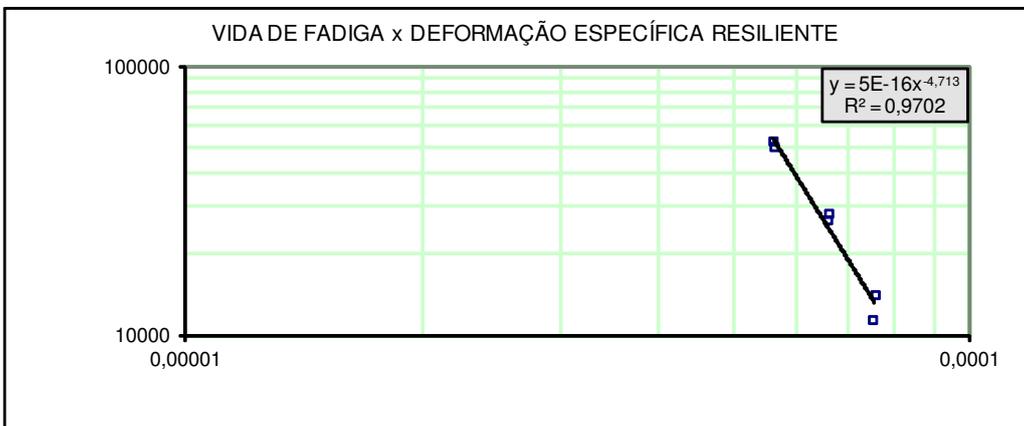
Temperatura de ensaio: 25 °C Operador(es): Daniel

Módulo resiliente inst. médio da amostra: 3413 MPa Inressado: Fabiano

Tensão de tração estática máxima,  $\sigma_{Tmax}$ : 0,71 MPa Data: 4-jan-16

Equação do cil. de carga ( 4 pol): 
 $P_{m(0-10)} = 0,0128F + 0,0163$   
 $F_{(0-10)} = 78,295Pm - 1,2442$

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm <sup>2</sup> )	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
1	6,57	10,00	30	201,2		0,0000560	0,76	52851
2	6,55	10,00	30	201,2		0,0000562	0,77	50351
3	6,51	10,00	35	234,7		0,0000659	0,90	28436
4	6,53	10,00	35	234,7		0,0000657	0,90	26891
5	6,49	10,00	40	268,2		0,0000756	1,03	14171
6	6,54	10,00	40	268,2		0,0000750	1,02	11451



F001+2001

## ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra: Tese Fabiano - Mistura Asfáltica CAP 55/75 (Superpave)      Protocolo:  

Temperatura de ensaio: 25 °C      Operador(es): Daniel

Módulo resiliente inst. médio da amostra: 3044 MPa      Inressado: Fabiano

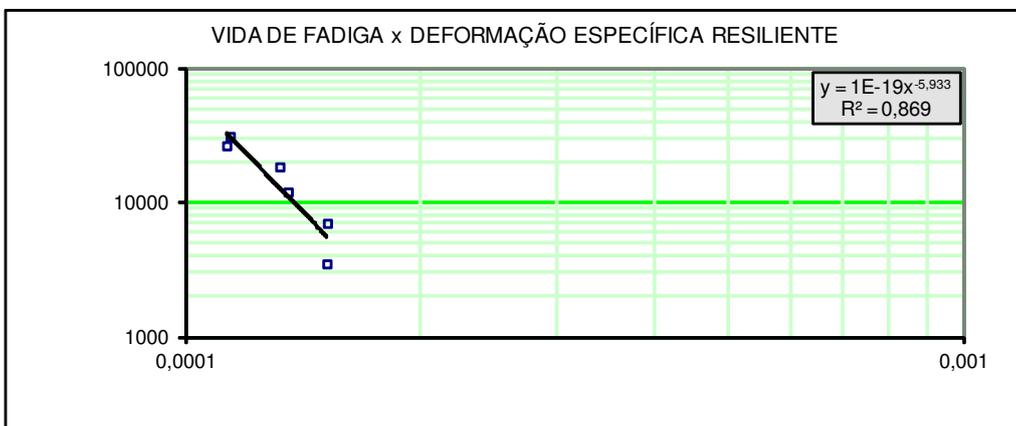
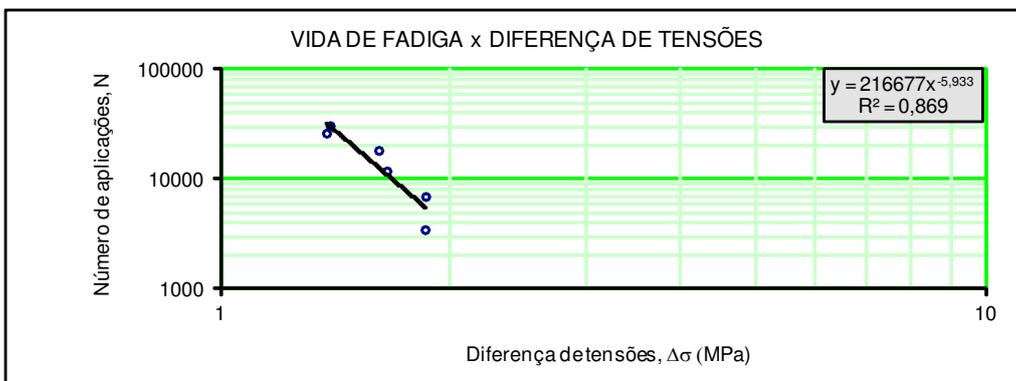
Tensão de tração estática máxima,  $\sigma_{Tmax}$ : 1,30 MPa      Data: 4-jan-16

Equação do cil. de carga ( 4 pol ): 

$$P_{m(0-10)} = 0,028F + 0,0163$$

$$F_{(0-10)} = 78,295Pm - 1,2442$$

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm <sup>2</sup> )	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
1	6,64	10,00	30	365,6		0,0001129	1,37	26616
2	6,57	10,00	30	365,6		0,0001141	1,39	31151
3	6,62	10,00	35	426,5		0,0001321	1,61	18541
4	6,46	10,00	35	426,5		0,0001354	1,65	12056
5	6,58	10,00	40	487,4		0,0001519	1,85	3521
6	6,57	10,00	40	487,4		0,0001521	1,85	7056



F001-2001

## ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra:  Protocolo:

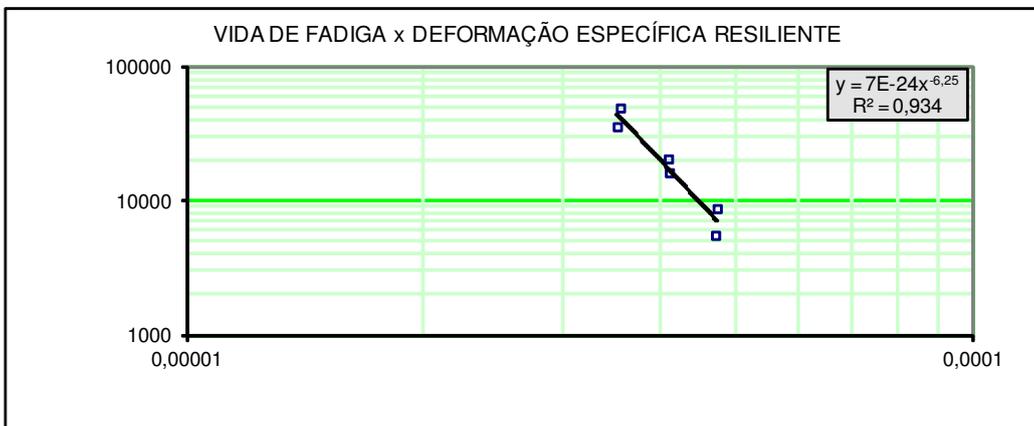
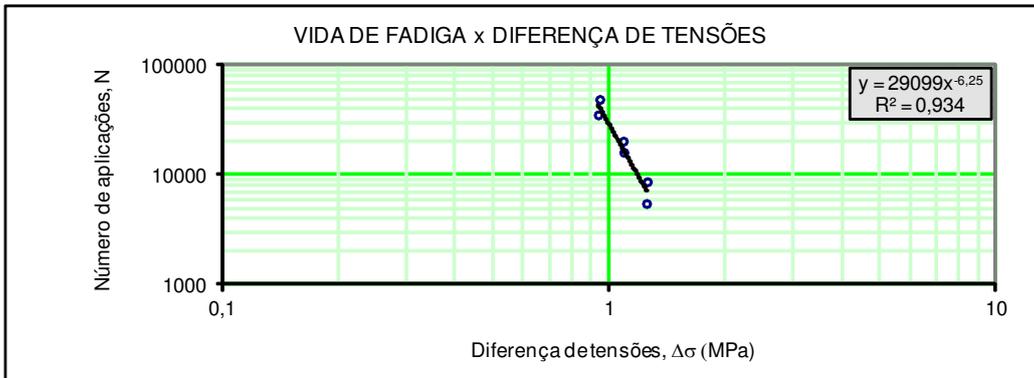
Temperatura de ensaio:  °C Operador(es):

Módulo resiliente inst. médio da amostra:  MPa Inressado:

Tensão de tração estática máxima,  $\sigma_{Tmax}$ :  MPa Data:

Equação do cil. de carga ( 4 pol ):  $P_{m(0-10)} = 0,028F + 0,0163$   
 $F_{(0-10)} = 78,295Pm - 1,2442$

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm <sup>2</sup> )	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
1	6,46	10,00	30	244,2		0,0000355	0,94	49306
2	6,52	10,00	30	244,2		0,0000352	0,94	35731
3	6,55	10,00	35	284,9		0,0000409	1,09	20571
4	6,53	10,00	35	284,9		0,0000410	1,09	16236
5	6,49	10,00	40	325,6		0,0000472	1,25	8776
6	6,52	10,00	40	325,6		0,0000470	1,25	5551



F001-2001

