

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE LIGANTES ASFÁLTICOS E  
MÁSTIQUES**

**IGOR AUGUSTO RODRIGUES**

**ORIENTADOR: MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS**

**CO-ORIENTADOR: LIOSBER MEDINA GARCÍA**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL**

**BRASÍLIA – DF, 10 DE DEZEMBRO DE 2015**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE LIGANTES ASFÁLTICOS E  
MÁSTIQUES**

**IGOR AUGUSTO RODRIGUES**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

---

**Márcio Muniz de Farias, D.Sc (UnB/DF)  
(ORIENTADOR)**

---

**Liosber Medina García, M.Sc (UnB/DF)  
(CO-ORIENTADOR)**

---

**Francisco Evangelista Júnior, D.Sc (UnB/DF)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**Luiz Guilherme Rodrigues de Mello, D.Sc (DNIT)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 10 de DEZEMBRO de 2015.

## FICHA CATALOGRÁFICA

RODRIGUES, IGOR AUGUSTO

### Propriedades reológicas de Ligantes Asfálticos

[Distrito Federal] 2015.

vii, - 90p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2015)

Trabalho de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Cimentos Asfálticos                      2. Propriedades dos ligantes

3. Propriedades Reológicas                4. *Creep* estático

I. ENC/FT/UnB                                II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RODRIGUES, I.A. (2015). **PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE LIGANTE ASFÁLTICOS E MÁSTIQUES**. Trabalho de Projeto Final, Publicação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 91 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: IGOR AUGUSTO RODRIGUES

TÍTULO DO TRABALHO DE PROJETO FINAL: **Propriedades Reológicas de Ligantes Asfálticos e Mástiques**

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2015

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Igor Augusto Rodrigues

[igor\\_ar@hotmail.com](mailto:igor_ar@hotmail.com)

SMPW Quadra 10 Conjunto 1 Lote 5 Casa H –PARK WAY

CEP: 71741-011 Brasília – DF – Brasil

## DEDICATÓRIA

*À minha mãe Vilma,  
meu Pai Valter  
Minha namorada Rayanne  
E meu irmão, Lucas*

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer inicialmente a duas pessoas que sempre estiveram ao meu lado apoiando minhas decisões e permitindo que eu finalizasse esta etapa da minha vida: meu pai e minha mãe. Obrigado por sempre fornecer a oportunidade e o suporte para obter conhecimento.

Gostaria de agradecer também à minha namorada, Rayanne, que sempre esteve ao meu lado e que mesmo quando tudo indicava o caminho para a desistência da conclusão desse trabalho ela foi a única pessoa que insistiu para que eu conseguisse chegar até o fim. Obrigado por sempre estar ao meu lado e sempre saber escutar e entender meu ponto de vista.

Gostaria de agradecer ao meu Orientador Prof Márcio pela oportunidade de trabalhar com o tema que escolhi. Sua dedicação ao ensino e suas aulas fizeram com que eu escolhesse a área de Pavimentação. Poucos Professores na Universidade são como ele.

Gostaria de agradecer ao meu Co-Orientador do Projeto Final 2, o Mestre Medina. Sem sua colaboração para a realização dos ensaios e, principalmente, com a parte numérica seria impossível a conclusão deste trabalho.

Ao Mestre Juan, que com seu conhecimento de todos os ensaios e procedimentos, me ajudou a dar continuidade aos procedimentos laboratoriais. Sem a sua colaboração, seria difícil a conclusão desse trabalho.

Aos meus amigos, que me acompanharam nessa jornada difícil, e que estiveram presente de diversas maneiras, mesmo não sendo fisicamente.

Aos colegas de laboratório, que me ajudaram com conselhos e dicas.

A todos que me ajudaram de alguma forma.

# PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE LIGANTES ASFÁLTICOS E MÁSTIQUES

## RESUMO

Os projetos de pavimentos no Brasil ainda utilizam métodos empíricos para seu dimensionamento, enquanto que em outros países a tendência é utilizar métodos mecanísticos, os quais requerem o uso de modelos viscoelásticos para análise de tensões e deformações nos revestimentos.. Nesse presente contexto, essa pesquisa tem como principal objetivo investigar as Propriedades Reológicas de Cimento Asfáltico Convencional e Modificado (Borracha) bem como as Propriedades dos Ligantes Misturados aos Agregados Miúdos e Fíler. Mais ainda, o objetivo específico desta pesquisa é verificar a aplicabilidade da teoria da Viscoelasticidade Linear ao comportamento de ligantes tradicionais na região do Distrito Federal com modelos do guia da AASHTO, o *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG). Para alcançar esse objetivo, foi utilizado o ensaios de *creep* estático para obter parâmetros de calibração do modelo viscoelástico presente no programa ABAQUS. Em seguida, foi realizada uma análise numérica e verificar se os dados obtidos com essa análise são compatíveis com os dados experimentais obtidos anteriormente.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1.	HISTÓRIA DO ASFALTO NO BRASIL.....	3
2.2.	HISTÓRICO DO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS .....	5
2.2.1.	Programas SHRP, NCHRP 1-37A e o MEPDG .....	6
2.3.	MATERIAIS VISCOELÁSTICO.....	8
2.3.1.	INTEGRAIS HEREDITÁRIAS E PROPRIEDADES FUNDAMENTAIS.....	9
2.4.	CURVA MESTRA.....	11
2.5.	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	11
2.6.	ABAQUS.....	12
3.	EMBASAMENTO TEÓRICO .....	14
3.1.	FLUÊNCIA.....	14
3.2.	RELAXAÇÃO .....	15
3.3.	INTEGRAIS HEREDITÁRIAS .....	16
3.4.	MODELOS REOLÓGICOS .....	19
3.4.1.	MODELO DE MAXWELL .....	20
3.4.2.	MODELO DE KELVIN .....	22
3.4.3.	MODELO DE BURGERS.....	23
3.5.	REÔMETRO DE CISALHAMENTO DINÂMICO .....	23
3.6.	CURVAS MESTRAS .....	24
4.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	27
4.1.	MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....	29
4.1.1.	GRANULOMETRIA.....	31
4.1.2.	DENSIDADE DO AGREGADO MIÚDO .....	31
4.1.3.	MASSA ESPECÍFICA REAL DO FÍLER.....	32
4.1.4.	DOSAGEM DA MISTURA .....	32
4.1.5.	ENSAIO DE <i>CREEP</i> ESTÁTICO.....	39

4.2.	MÉTODOS NUMÉRICOS.....	40
4.2.1.	CREEP TEST - SHEAR TEST DATA.....	42
4.2.2.	COEFICIENTES DA SÉRIE DE PRONY.....	45
5.	RESULTADOS E ANÁLISES .....	46
5.1.	ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO.....	47
5.2.	RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS AGREGADOS .....	48
5.2.1.	GRANULOMETRIA DO AGREGADO MINERAL.....	48
5.2.2.	GRANULOMETRIA DO AGREGADO DE MICROESFERAS DE VIDRO.....	50
5.2.3.	RESISTÊNCIA .....	51
5.2.4.	RESULTADOS DA DENSIDADE .....	52
5.3.	DOSAGEM DA MISTURA TIPO AAUQ.....	53
5.4.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O ENSAIO DE FLUÊNCIA.....	56
5.4.1.	RESULTADO DO ENSAIO COM AS MICROESFERAS .....	64
5.5.	RESULTADOS NUMÉRICOS ATRAVÉS DE ENTRADA DIRETA NO ABAQUS .....	66
5.6.	RESULTADOS NUMÉRICOS ATRAVÉS DAS SÉRIES DE PRONY .....	74
5.6.1.	CP6 AAUQ.....	75
5.6.2.	CP5 AAUQ.....	81
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	88
	BIBLIOGRAFIA.....	90
	APÊNDICE 1 .....	93

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 – Exemplo da janela do ABAQUS/CAE.....	12
Figura 2-2 – Exemplo da ilustração do pós-processamento realizado no ABAQUS/CAE.....	13
Figura 3-1 - Deformação típica de um ensaio de fluência (THEISEN, 2006).....	15
Figura 3-2 - Tensão típica de um ensaio de relaxação (THEISEN, 2006) .....	15
Figura 3-3 – Esquema de uma solitação harmônica em um material viscoelástico (DE MELLO, 2008).....	18
Figura 3-4 – Modelos Mecânicos para Materiais Viscoelásticos (HENNING <i>et al.</i> , 2009).....	20
Figura 3-5 – Exemplo de Curva Mestre e aplicação do <i>Shift Factor</i> (DE MELLO, 2008).....	27
Figura 4-1 – Condição das bolinhas de Gude no CP3 após ensaio de Fluência.....	28
Figura 4-2 – Misturador mecânico utilizado para a realização das misturas .....	35
Figura 4-3 a) compactador manual com molde Marshall; b) compactador mecânico .....	36
Figura 4-4 – a) Preparação da superfície plana para o capeamento; b) realização do capeamento e conferência do paralelismo das faces; c) corpo de prova capeado e em processo de estabilização de temperatura; d) corpo de prova no ensaio de <i>creep</i> estático .....	40
Figura 4-5 – Opções de entrada de comportamento dos materiais no ABAQUS: a) Parâmetros gerais, como, por exemplo, densidade; b) Opções de dados de comportamentos mecânicos; c) Parâmetros de comportamento elástico, por exemplo, Módulo de <i>Young</i> ; d) Parâmetros de comportamento viscoelástico, com a opção utilizada nesse trabalho: <i>Shear Test Data</i> .....	44
Figura 5-1 – Granulometria do Agregado Mineral Bruto .....	49
Figura 5-2 – Granulometria adotada após separação no peneiramento.....	50
Figura 5-3 – Tensão axial versus Tempo.....	57
Figura 5-4 – Variação da Tensão Aplicada Durante o Ensaio .....	57
Figura 5-5 – Deslocamento <i>versus</i> Tempo .....	58
Figura 5-6 – Deformação em função do Tempo.....	59
Figura 5-7 – <i>Creep Compliance</i> em função do Tempo .....	60
Figura 5-8 – Módulo de Relaxação em função do Tempo.....	60
Figura 5-9 – Temperatura no núcleo do corpo de prova vs tempo .....	61
Figura 5-10 – Deformação em função do Tempo com os CP's com o mesmo Teor de Ligante.....	62
Figura 5-11 – Deformação em função do tempo para a última rodada de CPs.....	64
Figura 5-12 – Corpos de Prova antes do ensaio (superior esquerda) e CP12 após o ensaio de fluência .....	65
Figura 5-13 – Deslocamento para os Corpos de Prova com Microesferas de Vidro .....	66

Figura 5-14 – Exemplo do Corpo de Prova: a) pronto para realizar a simulação; b) depois da simulação realizada .....	67
Figura 5-15 – Comparação entre os Deslocamentos nos instantes Iniciais do Ensaio com o Deslocamento ao Final do Ensaio com os Dados do ABAQUS .....	68
Figura 5-16 – Comparação entre o resultado experimental e os resultados fornecidos pelo ABAQUS para o CP4 .....	69
Figura 5-17 – Comparação entre o resultado experimental e os resultados fornecidos pelo ABAQUS para o CP6 .....	70
Figura 5-18 – Comparação entre o resultado experimental e os resultados fornecidos pelo ABAQUS para o CP8 .....	71
Figura 5-19 – Comparação entre o resultado experimental e os resultados fornecidos pelo ABAQUS para o CP10 .....	72
Figura 5-20 - Comparação entre o resultado experimental e os resultados fornecidos pelo ABAQUS para o CP4 .....	73
Figura 5-21 – Comparação entre o resultado do ABAQUS e os dados Experimentais, para o CP5 .....	74
Figura 5-22 – Resultado experimental do módulo de Relaxação e do <i>Creep Compliance</i> .....	76
Figura 5-23 – Comparação entre o resultado experimental e os dois ajustes da Série de Prony para o <i>Creep Compliance</i> .....	77
Figura 5-24 - Comparação entre o resultado experimental e os dois ajustes da Série de Prony para o Módulo de Relaxação .....	78
Figura 5-25 – Comparação entre os resultados do ensaio e o resultado dos dois ajustes após a simulação no ABAQUS.....	79
Figura 5-26 – Erro Relativo para os dois ajustes em relação ao deslocamento.....	80
Figura 5-27 – Comparação entre as duas metodologias de entrada de dados no ABAQUS.....	81
Figura 5-28 – Comparação entre o resultado experimental do módulo de Relaxação e do <i>Creep Compliance</i> .....	83
Figura 5-29 – Comparação entre o resultado experimental e os dois ajustes da Série de Prony para o <i>Creep Compliance</i> .....	84
Figura 5-30 - Comparação entre o resultado experimental e os dois ajustes da Série de Prony para o Módulo de Relaxação .....	85
Figura 5-31 - Comparação entre o resultado experimental e os dois ajustes da Série de Prony para o deslocamento.....	86
Figura 5-32 – Erro Relativo para os dois ajustes no CP5 em relação ao deslocamento.....	87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Nova Especificação Brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) (ANP, 2005).....	4
Tabela 3-1 – Constantes de Arrhenius típicas de misturas asfálticas (SILVA, 2009) .....	25
Tabela 3-2 – Constantes de WLF típicas de sistemas poliméricos e misturas asfálticas (SILVA, 2009)	25
Tabela 4-1 – Ensaio de viscosidade Brookfield das misturas de referência (MARTINEZ, 2014) .....	29
Tabela 4-2 – Especificações Gerais das Microesferas de Vidro.....	30
Tabela 4-3 – Faixas Granulométricas e Características de Dosagem Recomendadas pelo DNIT para AAUQ com CAP (DNIT 032/2005 – ES) .....	33
Tabela 4-4 – Temperaturas durante as etapas de confecção dos CPs.....	35
Tabela 5-1 – Resumo dos Dados dos Corpos de Provas Confeccionados .....	46
Tabela 5-2 – Granulometria do Agregado Mineral Bruto .....	48
Tabela 5-3 – Limites da Faixa B, faixa adotada, teor de asfalto utilizado e peso de agregado necessário em cada peneira.....	49
Tabela 5-4 – Massa retida (gramas) em cada peneira para as microesferas e Porcentual Final .....	51
Tabela 5-5 – Ensaio de Abrasão Los Angeles e Choque Treton.....	52
Tabela 5-6 – Densidade do Agregado Miúdo Mineral .....	52
Tabela 5-7 – Densidade do Fíler Mineral .....	52
Tabela 5-8 – Densidade do Agregado Miúdo Composto por Microesferas de Vidro .....	53
Tabela 5-9 – Densidade do Fíler Composto por Microesferas de Vidro .....	53
Tabela 5-10 – Resumo das Dimensões e Densidade dos Corpos de Prova.....	53
Tabela 5-11 – Densidade Máxima Teórica (DMT) para o Agregado Mineral.....	54
Tabela 5-12 – Parâmetros de Dosagem para os CPs Feitos com Agregado Mineral .....	54
Tabela 5-13 – Densidade Máxima Teórica (DMT) para os CPs com Microesferas de Vidro .....	55
Tabela 5-14 – Parâmetros de Dosagem para os CPs Feitos com Microesferas de Vidro.....	56
Tabela 5-15 – Temperaturas do Agregado, do Ligante, da Mistura e da Compactação.....	58
Tabela 5-16 – Índices de Dosagem.....	62
Tabela 5-17 – Classificação dos CP's quanto a deformação, densidade e volume de vazios .....	63
Tabela 5-18 – Série de Prony para o <i>Creep Compliance</i> e para o Módulo de Relaxação.....	76
Tabela 5-19 – Série de Prony para o <i>Creep Compliance</i> e para o Módulo de Relaxação.....	82

## LISTA DE NOMENCLATURA ABREVIações

AASHTO: *American Association of State Highway and Transportation Officials.*

AAUQ: Areia Asfalto Usinada a Quente.

ANP: Agência Nacional de Petróleo, Gás e Energia.

ASCE: *American Society of Civil Engineers.*

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo.

CBR: *California Bearing Ratio.*

CNT: Confederação Nacional dos Transportes.

DSR: Reômetro de Cisalhamento Dinâmico.

ESP: Eixo Padrão Simples.

MCR: *Modular Compact Rheometer.*

MEF: Método dos Elementos Finitos.

MEPDG: *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide.*

NCHRP: *National Cooperative Highway Research Program.*

PAV: *Pressure Aging Vessel.*

PSTT: Princípio da Superposição Tempo Temperatura.

RTFOT: *Rolling Thin Film Oven Test.*

SHRP: *Strategic Highway Research Program.*

Superpave: *Superior Performing Asphalt Pavements.*

## LISTA DE SÍMBOLOS

C: Constante de Arrhenius.

$C_1$  e  $C_2$ : constantes empíricas da equação de WLF.

D (t): é a função fluência.

$D_0$ : Coeficiente da série de Prony.

$D_i$ : Coeficiente i da série de Prony.

E (t): Função de relaxação.

$E^*$ : Módulo complexo.

E: Módulo de Young.

$E'$ : Módulo de Armazenamento ou *Storage Modulus.*

$E''$ : Módulo de Perda ou *Loss Modulus*.  
 $E_1$ : Módulo de elasticidade do elemento Kelvin.  
 $E_a$ : Energia de ativação.  
 $E_i$ : Módulo de elasticidade do elemento Kelvin/Maxwell.  
 $E_{\text{ensaio}}$ : Módulo de Relaxação obtido Diretamente do Ensaio.  
 $E_{\infty}$ : Módulo de Relaxação em Longo Prazo.  
 $G$ : Módulo de Cisalhamento.  
 $G_{\infty}$ : Módulo de Cisalhamento Normalizado em Longo Prazo  
 $N$ : número de repetições do eixo padrão.  
 $R$ : Constante universal dos gases.  
 $t$ : vida de projeto de um pavimento, ou tempo a partir de um referencial.  
 $T_0$ : Tempo de relaxação de um elemento Maxwell.  
 $T_1$ : Tempo de retardação de um elemento Kelvin ( $\eta_1/E_1$ ).  
 $T_R$ : Temperatura de referência ou Tempo de carregamento na temperatura de referência.  
 $\varphi$ : Ângulo de fase.  
 $\sigma$ : Tensão genérica.  
 $\varepsilon$ : Deformação genérica.  
 $\varepsilon(t)$ : é a deformação em função do tempo.  
 $\varepsilon_0$ : Deformação uniaxial constante ou Amplitude do pulso harmônico de deformação.  
 $\varepsilon_e$ : Deformação referente a parcela elástica (mola).  
 $\varepsilon_v$ : Deformação referente a parcela viscosa (amortecedor).  
 $\tau$ : Tensão cisalhante atuante ou Tempo contado a partir da aplicação da carga.  
 $\eta$ : Coeficiente de viscosidade.  
 $\eta_i$ : Coeficiente de viscosidade do elemento Kelvin/Maxwell número  $i$ .  
 $\gamma$ : Taxa de deformação cisalhante.  
 $\alpha_t$ : Shift fator ou fator de translação.  
 $\sigma_0$ : Tensão uniaxial constante ou Amplitude do pulso harmônico de tensão.  
 $\sigma_e$ : Tensão solicitante referente a parcela elástica (mola).  
 $\sigma_v$ : Tensão solicitante referente a parcela viscosa (amortecedor).  
 $\omega$ : Frequência angular.  
 $\omega_r$ : Frequência angular.  
 $\Delta t$ : Tempo de defasagem.  
 $\delta, \vartheta, \beta$  e  $\gamma$ : coeficientes da função sigmoidal.  
 $\Gamma$ : é a função gamma.

# 1. INTRODUÇÃO

O modal rodoviário é o mais utilizado no País, sendo responsável, por exemplo, por mais de 61% do transporte de carga (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT, 2015). A preferência pelo transporte rodoviário se acentua pela malha viária do Brasil alcançar territórios que geralmente não são contemplados por outros modais. Do mesmo modo, alguns fatores favorecem indevidamente a opção pelo transporte rodoviário no Brasil, entre eles pode-se destacar a irregularidade na jornada de trabalho dos motoristas, no qual esses acabam por fazer viagens mais rápidas para reduzir os custos; sonegação de impostos e carga além da permitida, que por não existir uma fiscalização adequada dos produtos transportados ocasiona, em médio prazo, destruições no pavimento asfáltico nacional, gerando mais custos; e cobranças de fretes abaixo aos exigidos (ARAÚJO, BANDEIRA, & CAMPOS, 2014).

Aliado a isso, ainda há a execução de pavimentos fora do padrão licitado, ou mesmo sem um projeto básico. Falta fiscalização do estado tanto na fase de execução, quanto na fase de operação, para evitar que veículos com carga excessiva danifiquem o revestimento asfáltico, o que acaba por encurtar sua vida útil (BABADOPULOS, 2013). A dificuldade de utilizar materiais de melhor qualidade, como, por exemplo, ligantes asfálticos modificados por polímeros ou por borracha de pneu moído, é outro problema a se considerar (BABADOPULOS, 2013). Apesar de muitos países, por meio de legislações, estarem direcionando seus departamentos de estradas de rodagem a pesquisarem sobre a utilização de matérias recicláveis em obras de pavimentação, principalmente em misturas de asfalto-borracha para recuperar estruturalmente pavimentos degradados e em camadas de revestimentos de pavimentos novos, o Brasil ainda caminha a passos lentos, sem apoio do governo (LAGARINHOS & TENORIO, 2008).

Assim, mesmo o asfalto sendo o material impermeabilizante mais antigo utilizado pelo homem é notável que a infraestrutura rodoviária não recebeu as mesmas contemplações dos avanços tecnológicos dados aos veículos de transporte rodoviário, afinal, essas, quando pavimentadas, se encontram em precárias condições, de acordo com a pesquisa CNT – Confederação Nacional dos Transportes – de Rodovias 2014 sendo apenas 12% da malha é pavimentada, e dessa malha pavimentada, 38,2% é considerada regular, enquanto que 17% é considerada como ruim e 6,9% é considerada péssima.

Apesar disso, na Engenharia Civil, o asfalto tem sido estudado pelas grandes áreas da Geotecnia e Infraestrutura de Transportes, mais especificamente pela área de pavimentação asfáltica. Essa está relacionada tanto aos tratamentos de dados e procedimentos de ensaio, no qual ambos estão associados à modelagem do comportamento termomecânico das misturas asfálticas utilizadas em revestimentos de pavimentos asfálticos; como ao dimensionamento de pavimentos rodoviários, que são estruturas de múltiplas camadas de espessuras finitas (PORTELA, 2011).

Esse estudo então se justifica pela relevância acadêmica de aperfeiçoar procedimentos de ensaios laboratoriais e obter, a partir dos resultados das análises, um aperfeiçoamento da compreensão das propriedades reológicas. Já a relevância científica social visa, futuramente, a melhoria na qualidade das rodovias brasileiras, visto que o método de dimensionamento no Brasil é de 1966, baseado no método Empírico do Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE) (MOTTA e MEDINA, 2005). O processo não leva em conta as propriedades reológicas do asfalto, estando desatualizado com as propriedades dos materiais atuais.

Este método determina a espessura das camadas baseado no valor de CBR do subleito, ensaio o qual mede a resistência à penetração em uma amostra saturada compactada segundo a energia Proctor, e baseado no número  $N$ , o qual é o número de repetições do eixo padrão simples (ESP) durante a vida de projeto de  $t$  anos de um pavimento. Existe uma tendência crescente de se utilizar os métodos mecanísticos nas diversas atividades envolvidas no projeto de pavimentos, com o desenvolvimento constante da tecnologia (PORTELA, 2011).

Nesse presente contexto, buscando averiguar possíveis soluções que possam contemplar pavimentos mais duráveis, mais resistentes, assim como que demandem pequenas manutenções ao longo do período para que fossem projetados. Portanto, essa pesquisa tem como principal objetivo investigar as Propriedades Reológicas de Cimento Asfáltico Convencional e Modificado (Borracha) bem como as Propriedades dos Ligantes Misturados aos Agregados Miúdos e Fíler. Mais ainda, o objetivo específico desta pesquisa é verificar a aplicabilidade da teoria da Viscoelasticidade Linear ao comportamento de ligantes tradicionais na região do Distrito Federal com modelos do guia da AASHTO, o *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG).

Para esse estudo se tornar possível, foram realizados os ensaios de caracterização do ligante para poder avaliar as propriedades básicas (ponto de fulgor, ponto de amolecimento,

elasticidade, viscosidade); ensaio de caracterização dos agregados para poder avaliar suas propriedades básicas e também o ensaio de *creep* estático, visando à obtenção de parâmetros do modelo viscoelástico existente no programa ABAQUS, para que assim seja possível a simulação de um corpo de prova como problema de contorno e a comparação do resultado dessa simulação com os dados experimentais obtidos nos ensaios.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo, apresenta-se a revisão da literatura necessária para a realização deste trabalho. Todas as expressões matemáticas foram colocadas no capítulo 3, no embasamento teórico.

### **2.1. HISTÓRIA DO ASFALTO NO BRASIL**

O revestimento asfáltico é utilizado em cerca de 95% das estradas pavimentadas no Brasil (BERNUCCI, DA MOTTA, *et al.*, 2008). O asfalto proporciona diversos motivos para seu uso intensivo, entre eles: permite boa impermeabilização, sendo durável e resistente à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais, podendo ser utilizado com o aquecimento ou emulsionado, com ou sem aditivos; atua como um ligante, proporcionando forte coesão entre os agregados e permitindo flexibilidade controlável.

Através da destilação do petróleo, obtém-se o asfalto que é um ligante betuminoso. Com a extração dos óleos combustíveis, o material remanescente é processado dando origem ao Cimento Asfáltico de Petróleo (JUNIOR, 2008). Em termos de composição química, o asfalto é definido como um sistema coloidal, constituído por micelas de asfaltenos dispersas em um meio intermicelar oleoso, formado pela mistura de óleos aromáticos e saturados, chamados maltenos.

Quando é realizada a classificação do asfalto de acordo com suas propriedades físicas, ele passa a ser comumente denominado pela sigla CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) seguido por algum identificador numérico. A Agência Nacional de Petróleo, Gás e Energia (ANP) aprovou em 2005, em substituição às duas classificações anteriores, a especificação que é baseada na penetração e nos ensaios de: Ponto de amolecimento; Viscosidade Saybolt-Furol; Viscosidade Brookfield; Índice de Suscetibilidade Térmica; Ponto de Fulgor; Solubilidade em tricloroetileno; Dutilidade. A classificação está apresentada na Tabela 2-1 a

seguir.

Tabela 2-1 - Nova Especificação Brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) (ANP, 2005)

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS	
		CAP 30 - 45	CAP 50 - 70	CAP 85 - 100	CAP 150 - 200	ABNT	ASTM
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	Dmm	30 – 45	50 - 70	85 -100	150 - 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-Furol	S					NBR 14950	E 102
- a 135 °C, mín		192	141	110	80		
- a 150°C, mín		90	50	43	36		
-a 177°C, mín		40 - 70	15 - 60	15 - 60	15 - 60		
OU							
Viscosidade Brookfield	cP					-	D 4402
- a 135°C, SP 21 mín. 20 rpm		374	274	214	155		
- a 150°C, SP 21 mín.		203	112	97	81		
- a 177°C, SP 21 mín		76 - 133	28 - 114	28 - 114	28 - 114		
Índice de susceptibilidade térmica (1)		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)		
Ponto de fulgor mín	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Ductilidade a 25° C, mín	Cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
<b>Efeito do calor e do ar</b>							
<b>(RTFOT) a 163 °C, 85 min</b>							
Varição em massa, máx	%	0,5	0,5	0,5	0,5	-	D 2872
Ductilidade a 25° C, mín	Cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

O asfalto tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplástico ou termoviscoelástico. O comportamento termoviscoelástico é mais comumente assumido do que o termoviscoplástico, com suficiente aproximação do real comportamento desse material, com características que dependem da velocidade, do tempo e da intensidade de carregamento e da

temperatura de serviço (BERNUCCI, DA MOTTA, *et al.*, 2008). Quando em temperaturas suficientemente elevadas e em tempos de carregamentos longos, o CAP puro se comporta quase que completamente com um fluido viscoso (newtoniano). Porém, em temperaturas baixas e carregamentos de curta duração, o cimento asfáltico se comporta quase como um sólido elástico. Em vista disso, quando em temperaturas intermediárias, ele possui características relativas aos dois comportamentos, apresentando um comportamento viscoelástico (JUNIOR, 2008), que será elucidado a seguir.

## **2.2. HISTÓRICO DO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Em 1938, o engenheiro Porter, ao expor recomendações sobre a espessura de revestimento asfáltico, deu início, mesmo que de forma vagarosa, a marcha rumo ao dimensionamento racional de pavimentos flexíveis. Esse se baseou nos ensaios de *California Bearing Ratio* (CBR ou ISC) e expansão, assim como em seus conhecimentos acumulados no Estado da Califórnia. Porém, mesmo naquela época, o próprio Porter constatava que os valores de CBR não poderiam medir de forma direta a capacidade de suporte dos materiais (CONCEPA; LAPAV, 2012).

Apesar disso, só em meados do século XX, o engenheiro Porter concluiu que os resultados gerados pelo CBR interviam limitadamente nas deformações elásticas. Nessa mesma época, porém, o pesquisador Turnbull examinava que o ensaio de CBR era basicamente um ensaio de cisalhamento simples, observando então o CBR era um índice de tensão cisalhante.

Quase ao final do século, após mais análises sobre esse ensaio, High e Stevens (1982) advertiram que não se conhecia e não existia um controle de drenagem sobre os estados de tensões efetivas dentro do cilindro CBR. Nessa mesma época, outro estudioso, Nutt (1982) complementou esse achado, assegurando que, não haveria, na verdade, uma relação direta entre o CBR e a deformabilidade ou resistência (CONCEPA; LAPAV, 2012).

Diante dessas limitações, é essencial destacar sobre a cultura do CBR. Esse, ainda durante a 2ª Guerra Mundial, teve sua importância quando os Engenheiros do Exército dos EUA decidiram desafiar e pavimentar pistas de pouso, em frente ao Pacífico, estendendo o emprego das curvas de dimensionamento de Porter, que se baseavam no CRB. Algumas décadas depois, em 1950, em um Simpósio da ASCE (*American Society of Civil Engineers*), foi discutido sobre as curvas de dimensionamento baseadas no CBR, nos quais sugeriram que

essas tinham como propósito oferecer condições de tráfego a pavimentos aeroportuários, que deveriam durar de dias a semanas, porém não anos. A partir disso, pode-se ter mais clareza que o CBR deveria ser analisado como um índice de resistência ao cisalhamento, tendo que as curvas de dimensionamento expostas por Porter, possuíam como função exclusiva proteger o subleito de pavimentos delgados contra a ruptura por cisalhamento. Com o exposto, há que se destacar que no Estado da Califórnia, há 60 anos o CBR não é mais usado (BROWN, 1996).

Outro ponto a se considerar nessa extensa marcha rumo a metodologias racionais para dimensionamento de pavimentos flexíveis, são as soluções gráficas propostas por Burmister, em 1940, no qual esse considerou o pavimento um sistema constituído por 2 ou 3 camadas (Brown, 1996). Já em 1955, vínculos foram estabelecidos, pelo engenheiro Francis Hveem, entre o trincamento por fadiga de revestimentos asfálticos e a magnitude dos deslocamentos elásticos superficiais (deflexões), para os que contribuem com todas as camadas do pavimento e o subleito.

Alguns anos após Hveem ter proposto essa relação, realizou-se, entre 1958 e 1960, o AASHTO Road Teste, no qual foram requisitados pavimentos flexíveis e rígidos por tráfego real aplicado por caminhões. Assim, esse introduziu novos conceitos, como de serventia, e ainda deu subsídio para o Guia para Dimensionamento de Pavimentos da AASHTO (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures). Cabe então salientar que esse procedimento experimental foi revisado em diversas ocasiões, sendo que a última dessas, em 1993, foi permutada pelo procedimento empírico-mecanístico.

A 1ª Conferencial Internacional sobre Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos, motivada após os resultados do AASHTO Road Test, assim como a de 1967, tiveram como intuito apresentar soluções para cálculo de tensões e deformações em sistemas de múltiplas camadas, aproveitando os progressos computacionais. Afinal, entre as décadas de 60 e 70, foi evidenciado um desenvolvimento nos programas computacionais com modelagem elástico-linear (como, por exemplo, o ELSYM5), elástico não linear (como, por exemplo, o ILLIPAVE) e viscoelástica (como o VESYS), o que deu abertura para a progressiva melhoria dos métodos mecanísticos (CONCEPA; LAPAV, 2012).

### **2.2.1. Programas SHRP, NCHRP 1-37A e o MEPDG**

É notável o desenvolvimento dos Estados Unidos em relação às pesquisas relacionadas com a pavimentação. O Programa SHRP e o programa NCHRP são americanos e

relacionados com novas técnicas de avaliação dos ligantes e de dimensionamento do pavimento flexível.

O SHRP (*Strategic Highway Research Program*) foi um programa estabelecido pelo Congresso dos Estados Unidos em 1987, visando melhorar a durabilidade, a segurança e o desempenho das estradas. Sendo assim, um dos principais resultados desse programa foi a proposição de novos métodos de avaliação dos ligantes asfálticos. Essas novas especificações passaram a ser conhecidas como Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavements*). O foco do programa foi: como a temperatura afeta as etapas de processo da mistura, espalhamento e compactação e como a temperatura afeta o desempenho do pavimento flexível ao longo da sua vida útil (BERNUCCI, DA MOTTA, *et al.*, 2008). Além do foco na temperatura, para realizar o carregamento leva-se em conta a velocidade do carregamento e o volume de tráfego.

Novos ensaios foram estabelecidos para criar uma nova classificação baseada em graus de temperatura máxima e mínima em que o ligante apresenta certas propriedades. Os ensaios são de caráter reológico e seus parâmetros correlacionam as características dos ligantes ao desempenho das misturas em serviço. Os ensaios são: Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR); Viscosímetro Rotacional; Reômetro de Fluência em Viga; Prensa de Tração Direta; Estufa de Película Delgada Rotacional (RTFOT) e Vaso de Pressão de Envelhecimento (PAV).

Em 2004 o projeto de dimensionamento foi revisado novamente, fruto do projeto NCHRP 1-37A. A motivação dessa revisão veio pelo desenvolvimento de novas ferramentas mecanísticas, frente ao elevado grau de empirismo das versões anteriores, fora a evolução dos veículos e das pressões aplicadas pelos seus pneus. O NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*) patrocinado pela AASHTO desenvolveu o projeto 1-37A que foi uma pesquisa para um novo método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos resultando posteriormente no *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG) da AASHTO. Portela (2011) traz o processo de dimensionamento através do método do MEPDG:

- Baseado nos dados de tráfego, clima e materiais, definir uma estrutura de pavimento;
- Seleção de critérios de desempenho com previsão para um nível desejado de confiança;

- Processamento dos dados de entrada para geração dos esforços oriundos do tráfego, clima e materiais;
- A partir de modelos das camadas elásticas ou pelo Método dos Elementos Finitos, calcular a resposta do pavimento;
- Cálculo do dano acumulado;
- Previsão de conforto ao rolamento;
- Verificação do atendimento aos critérios definidos através da avaliação da estrutura pré-estabelecida e.

Nesse método, o maior avanço se dá na consideração da rigidez da camada pelo Módulo Dinâmico, mostrando que a tendência são os modelos com caráter mais mecânicos ao invés dos modelos com caráter mais empírico.

### **2.3. MATERIAIS VISCOELÁSTICO**

Como citado no item da história do asfalto, o CAP pode apresentar comportamento intermediário, fazendo necessários modelos mais sofisticados como o modelo viscoelástico. A seguir será explanado o modelo viscoelástico, e como se chegou até nas curvas mestras.

Quando um material é submetido a tensões, ele pode armazenar ou dissipar a energia que foi fornecida. Quando o material é dito elástico, toda a energia mecânica que foi fornecida ao sistema é armazenada, podendo seguir a lei de proporcionalidade linear representada pelo Módulo de Young  $E$ , quando a tensão ( $\sigma$ ) é diretamente proporcional à deformação ( $\epsilon$ ); ou não linear quando a tensão não é proporcional à deformação. Tratando-se da elasticidade linear, a tensão ( $\sigma$ ) depende apenas da deformação ( $\epsilon$ ), sendo o caminho percorrido durante o carregamento em um diagrama tensão deformação igual ao caminho de descarregamento, se superpondo (BABADOPULOS, 2013).

Em contrapartida, quando há uma relação linear entre a tensão cisalhante atuante ( $\tau$ ) e a taxa de deformação cisalhante  $\dot{\gamma}$  relacionada ao coeficiente de viscosidade ( $\eta$ ), chega-se na representação do comportamento viscoso linear. As equações que associam as tensões e as deformações (ou suas taxas) são denominadas leis constitutivas (SILVA, 2009).

Em alguns casos, o material não armazena e não dissipa toda a energia mecânica que é fornecida ao sistema, sendo então o comportamento desses materiais fora do escopo das teorias da Elasticidade ou Viscosidade, necessitando então de outros modelos para melhor

descrever esse comportamento (DE MELLO, 2008). Nesses casos, aparecem modelos viscoelastoplásticos. Contudo, a adoção de simplificações que resultem em modelos constitutivos mais restritos é prática comum devido a dificuldades relativas à compreensão. Adotando-se uma hipótese de pequeno nível de tensão aplicada nos corpos de prova e as a necessidade de simplificações, o modelo viscoelastoplástico é reduzido ao modelo viscoelástico, já que as deformações plásticas e viscoplásticas são desprezíveis frente ao pequeno nível de tensão aplicada (SILVA, 2009).

Quando é aplicado em materiais viscoelásticos um carregamento com uma taxa lenta (baixas frequências), o material apresenta deformações lentas com o passar do tempo, aproximando-se do comportamento dos fluidos viscosos. Em compensação, quando esses materiais recebem carregamentos rápidos (alta frequência), eles se aproximam do comportamento dos sólidos elásticos. As deformações permanentes são, na verdade, recuperáveis no modelo viscoelástico linear, mas em um tempo superior se comparado ao tempo de análise de deformações e tensões, tornando as deformações permanentes no ponto de vista prático (BABADOPULOS, 2013).

Como explicitado no parágrafo anterior, a relação entre tensões e deformações nos materiais viscoelásticos dependem do tempo. Thiesen (2006) traz em sua tese alguns fenômenos que ocorrem nestas relações quando o material comporta-se como viscoelástico tais como:

- Resiliência menor que 100 %;
- A rigidez depende da taxa de aplicação de carga;
- Se uma carga cíclica é aplicada, ocorre histerese (uma defasagem) resultando em dissipação de energia mecânica;
- Aplicada uma tensão constante, a deformação cresce com o tempo (fluência);
- Aplicada uma deformação constante, a tensão diminui com o tempo (relaxação).

### **2.3.1. INTEGRAIS HEREDITÁRIAS E PROPRIEDADES FUNDAMENTAIS**

As tensões (ou deformações) resultantes, para materiais no regime viscoelástico linear, dependem de todo o histórico de carregamento e estas grandezas são relacionadas por meio de integrais de superposição de Boltzmann, ou integrais de convolução (SILVA, 2009). As

equações serão mostradas na parte de embasamento teórico. As integrais trazem as funções de relaxação e fluência, propriedades intrínsecas do material.

Silva (2009) menciona em sua tese que os livros que abordam a teoria da viscoelasticidade (FERRY, 1980; CHRISTENSEN, 1982; SCHAPERRY 1982; LAKES, 1998; KIM, 2006) ressaltam que as propriedades de relaxação e fluência não são grandezas independentes. Babadopulos (2013) menciona que por serem propriedades fundamentais que representam a mesma característica do material, elas são grandezas interdependentes. Ou seja, para a caracterização das propriedades viscoelásticas do material, basta a determinação de uma das duas. Ambos os autores concordam que as duas propriedades não apresentam relação de reciprocidade perfeita, porém uma propriedade pode ser obtida matematicamente a partir da outra (BABADOPULOS, 2013; SILVA, 2009; KIM, 2006; WILLIANS *et al.*, 1955).

As funções definidas nas integrais hereditárias são obtidas para casos onde o ensaio é estático, não representando algumas situações práticas onde se encontra um material viscoelástico sob solicitações harmônicas ou oscilatórias. Além disso, existem algumas dificuldades operacionais, que serão explicadas no embasamento teórico, que dificultam os ensaios de relaxação e fluência. Por isso, nesses casos, os materiais viscoelásticos são caracterizados por meio do: Módulo Complexo ( $E^*$ ) e ângulo de fase ( $\phi$ ); duas propriedades que determinam as respostas mecânicas perante condições de solicitações harmônicas em regime permanente (DE MELLO, 2008).

Quando os ensaios são realizados com solicitações harmônicas, esses ensaios se encontram no domínio da frequência, uma vez que para cada frequência diferente, existirá um resultado diferente. O tempo de ensaios no domínio da frequência tem duração mais curta do que os ensaios no domínio do tempo (ensaio como o de fluência e relaxação) (SILVA, 2009). Devido a essa e outras vantagens, o novo método de dimensionamento da AASTHO, o *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG), faz o uso do Módulo Complexo.

Além da frequência, a temperatura é fator importante na análise do comportamento de um material viscoelástico. Por limitações dos equipamentos e de tempo, na caracterização mecânica dos materiais asfálticos, utiliza-se da determinação da Curva Mestre do material. Esse artifício será explicado nos próximos itens e no embasamento teórico.

## 2.4. CURVA MESTRA

Estudos clássicos da teoria da viscoelasticidade linear explicam que uma descrição completa do comportamento de tais materiais só é possível para uma faixa de tempo muito ampla, em torno de 10 a 15 ordens logarítmicas. Experimentalmente, isto é impraticável (SILVA, 2009). Uma possível solução para esta dificuldade é o Princípio da Superposição Tempo Temperatura (PSTT), que permite a derivação de curvas de propriedades viscoelásticas (módulo complexo, fluência, relaxação) para certa temperatura a partir de partir de curvas obtidas para outras temperaturas. Isso só é possível pois o princípio estabelece que um aumento na temperatura é aproximadamente equivalente a um aumento no tempo de observação.

Assim, ao invés de realizar um ensaio com um longo tempo de observação, pode-se realizar um ensaio com um curto tempo de observação, mas para diferentes temperaturas. Após montar as curvas experimentais, é possível deslocar no eixo do tempo as curvas experimentais por um fator  $a_T$  (*shift fator*), resultando em uma curva chamada de Curva Mestre, com faixa de domínio bem mais ampla (SILVA, 2009; DE MELLO, 2008).

## 2.5. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Gauss propôs por volta do século XVIII à utilização de funções de aproximação para solução de problemas matemáticos, surgindo então a proposta do Método dos Elementos Finitos (MEF). Todavia, pouco se evoluiu durante mais de um século devido à dificuldade e a limitação existente no processamento de equações algébricas. Com o advento da computação, por volta de 1950, o método começou a ter seu desenvolvimento prático. O Método dos elementos finitos consiste em discretizar um domínio contínuo que mantém as propriedades de quem os originou. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos (LOTTI, MACHADO, *et al.*, 2006).

Os nós se encontram nas extremidades de cada elemento finito, que conectam os elementos entre si, formando assim uma malha arranjada em camadas tridimensionais. É através dos nós que as informações são passadas entre os elementos. Cada nó possui um número definido de graus de liberdade, que caracterizam como o nó irá se deslocar no espaço. O próximo passo, e o mais importante, é a determinação das propriedades de cada elemento; é aqui que entra o tipo de modelo adotado: elástico linear, elástico não-linear, viscoelástico. Depois disso, o último passo é a determinação das condições de contorno.

## 2.6. ABAQUS

O ABAQUS é um programa para análise numérica, pelo Método dos Elementos Finitos, muito versátil e utilizado em muitas áreas da engenharia. O ABAQUS é dividido em três estágios distintos: pré-processamento, simulação e pós-processamento. A ligação desses estágios é feita através de arquivos (MONTEIRO, 2007).

O pré-processamento é realizado no ABAQUS/CAE, onde é determinado o modelo do problema físico e assim cria-se um arquivo de entrada de ABAQUS. Se a análise for simples, esse arquivo de entrada pode ser criado em um editor de texto, se não o modelo é criado graficamente no ABAQUS/CAE. Um exemplo da janela do ABAQUS/CAE pode ser vista na Figura 2.1, onde é possível ver a discretização de um corpo de prova cilíndrico.

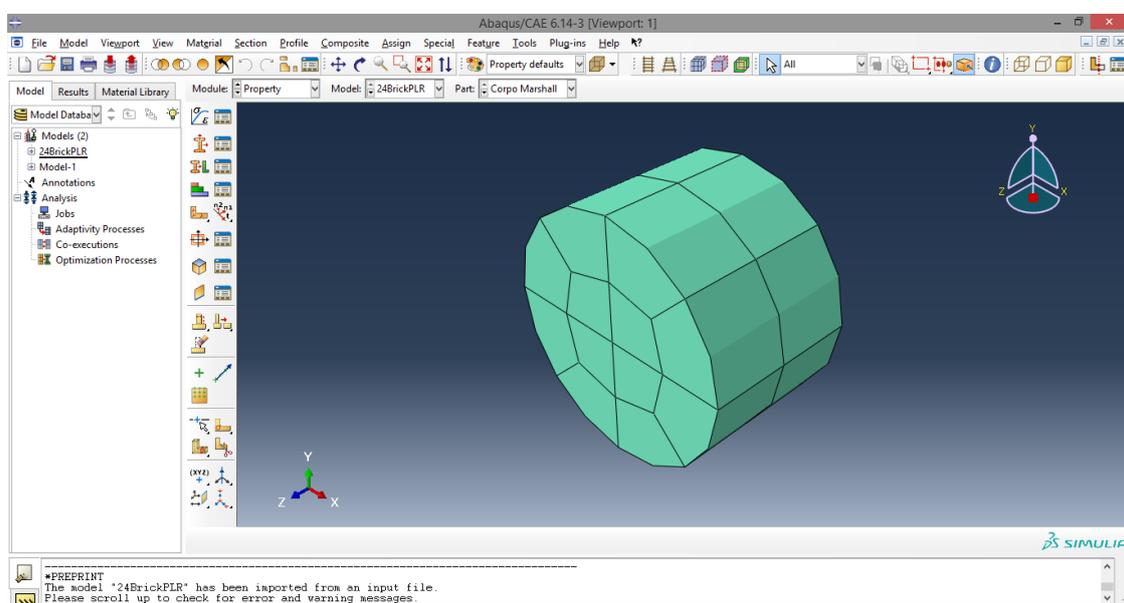


Figura 2-1 – Exemplo da janela do ABAQUS/CAE

A simulação acontece como um processo de background no ABAQUS/Standard ou ABAQUS/Explicit e corresponde ao estágio onde o programa resolve o problema numérico definido no modelo na parte de pré-processamento. É criado, então, um arquivo de saída pronto para o pós-processamento.

Finalmente, o pós-processamento é realizado no ABAQUS/CAE. É que aqui são avaliados os resultados dos deslocamentos, tensões ou outras variáveis fundamentais. Existem diversas opções para a visualização dos dados de saída, desde animações, contorno com cores

ou gráficos. Uma dessas visualizações está ilustrada na Figura 2.2, onde foi avaliada a deformação do corpo de prova ilustrado na Figura 2.1.

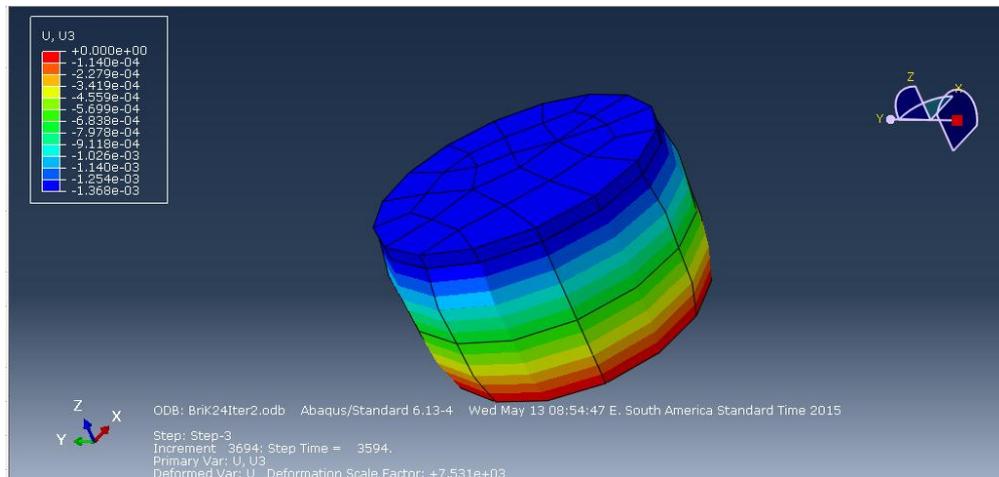


Figura 2-2 – Exemplo da ilustração do pós-processamento realizado no ABAQUS/CAE

No âmbito dessa pesquisa, o interesse no programa são os modelos pré-existentes para modelagem viscoelástica de um corpo de prova como problema de contorno. Nesse caso, o ABAQUS possui somente o modelo baseado nas séries de Prony. No caso do domínio do tempo o ABAQUS pode ser utilizado para aplicações de pequena deformação onde a resposta elástica independente da taxa e pode ser definida com um modelo de material elástico linear e para aplicações de grande tensão em que a resposta elástica independente da taxa deve ser definida como um modelo de material hiperelástico (DASSAULT SYSTÈMES, 2013). O ABAQUS assume, então, que o material viscoelástico é definido por uma expansão da série de Prony a partir do módulo de relaxação.

No caso do domínio da frequência, os parâmetros dos dados de entrada, para a parte dissipativa do comportamento dos materiais, são definidos pela parte real e imaginária do módulo complexo. O módulo pode ser definido como função da frequência por três maneiras: por uma lei de potência, por uma planilha de dados ou por uma expressão da série de Prony para o módulo de relaxação. Mas no caso de materiais asfálticos, a série de Prony é que possui os melhores resultados (DE SOUSA e SOARES, 2007).

### 3. EMBASAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo é apresentado o referencial teórico necessário para dar suporte à análise dos dados e apresentar os conceitos, teorias e modelos que sustentaram a argumentação da pesquisa.

#### 3.1. FLUÊNCIA

Quando o material é submetido a uma tensão constante, uma deformação lenta e progressiva aparece, caracterizando assim o fenômeno da Fluência. Durante o ensaio de fluência (ou *creep test*), este comportamento é notado em materiais viscoelásticos. Resultados típicos desses ensaios são funções onde as deformações crescem ao longo do tempo, mas com declividade decrescente (THEISEN, 2006).

A função fluência pode ser descrita através da seguinte equação:

$$D(t) = \varepsilon(t)/\sigma_0 \quad (3.1)$$

onde  $D(t)$  é a função fluência;

$\varepsilon(t)$  é a deformação em função do tempo;

$\sigma_0$  é uma tensão uniaxial constante aplicada.

A Figura 3.1 elucidada o comportamento elástico, viscoelástico e viscoso sob uma mesma solitação. Percebe-se que entre o comportamento elástico e viscoso, há o comportamento viscoelástico, com acréscimo de deformação ao longo do tempo, mas tendendo a um valor constante. A parcela elástica da deformação pode ser vista no salto da curva no início e no fim da aplicação da carga, ocorrendo geralmente em materiais viscoelástico.

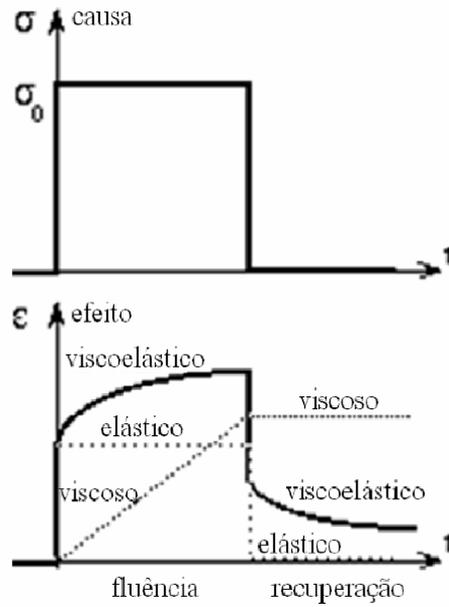


Figura 3-1 - Deformação típica de um ensaio de fluência (THEISEN, 2006)

### 3.2. RELAXAÇÃO

Relaxação é quando o material é mantido sob deformação constante e ocorre o decréscimo gradual da tensão. Esse comportamento é notado quando se executa o ensaio de relaxação. Funções típicas de relaxação são decrescentes em função do tempo.

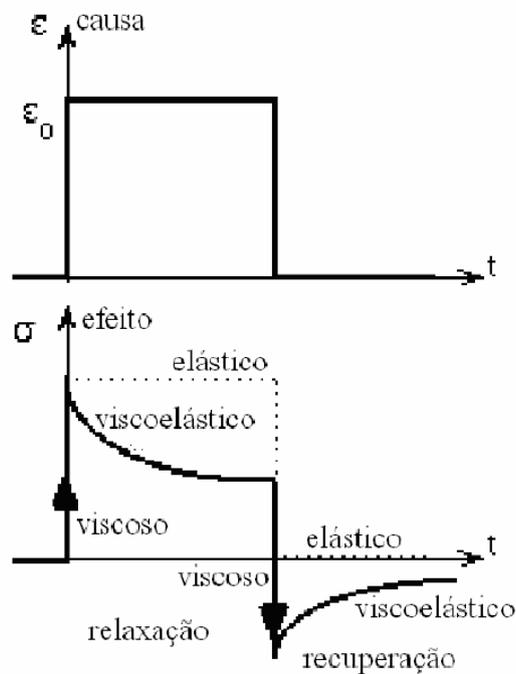


Figura 3-2 - Tensão típica de um ensaio de relaxação (THEISEN, 2006)

A função Relaxação é descrita pela equação:

$$E(t) = \sigma(t)/\varepsilon_0 \quad (3.2)$$

onde  $E(t)$  é o módulo de relaxação;

$\sigma(t)$  é a tensão em função do tempo;

$\varepsilon_0$  é a deformação uniaxial constante aplicada.

Na Figura 3.2, novamente, percebe-se que o comportamento do material viscoelástico é intermediário entre o viscoso e o elástico. Uma tendência de estabilização da tensão ao longo do tempo está presente. Esta tendência, que ocorre instantaneamente num material elástico, acontece com um decréscimo da tensão (THEISEN, 2006).

### 3.3. INTEGRAIS HEREDITÁRIAS

Como explicado no referencial teórico, as equações constitutivas dos materiais viscoelásticos, devido à dependência do tempo e da taxa de aplicação da carga, deixam de ser algébricas e passa a ser descritas por integrais de convolução. No caso de materiais viscoelástico lineares, as relações tensão-deformação são dadas pelas seguintes equações :

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t - \tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} \partial \tau \quad (3.3)$$

$$\varepsilon(t) = \int_0^t D(t - \tau) \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} \partial \tau \quad (3.4)$$

onde  $E(t)$  é o módulo de relaxação;

$D(t)$  é a função fluência;

$t$  é o tempo a partir de um referencial;

$\tau$  é o tempo contado a partir do início da aplicação da carga.

Segundo Soares e de Souza (2002), para se resolver as equações (3.3) e (3.4) a função fluência ou o módulo de relaxação precisam ser representados matematicamente. A série de Prony é umas das representações matemáticas mais utilizadas, é dada pela equação por:

$$D(t) = D_0 + \sum_{i=1}^N D_i \left[ 1 - \exp \left( -\frac{t}{T_i} \right) \right] \quad (3.5)$$

onde  $D_0$ ,  $D_i$ 's são os coeficientes da série de Prony;

$T_i$ 's são os tempos de relaxação.

Huang (1993) afirma que com a curva de fluência dada, as constantes viscoelásticas de um modelo genérico qualquer podem ser determinadas pelo método dos resíduos sucessivos (*Successive Residuals*), porém é mais conveniente usar um método de colocação (*Collocation Method*).

De acordo com Schapery (1982), citado por Portela (2011), duas condições devem ser atendidas para que o material tenha um comportamento linear, seja ele viscoso ou elástico: homogeneidade (ou proporcionalidade) e a superposição, sendo este último conhecido como o Princípio da Superposição de Boltzmann (PORTELA, 2011). A proporcionalidade é expressa matematicamente da seguinte forma:

$$\varepsilon[c\sigma(t)] = c\varepsilon[\sigma(t)] \quad (3.6)$$

onde  $c$  é uma constante qualquer, enquanto que a superposição é expressa como:

$$\varepsilon[\sigma_1(t - t_1) + \sigma_2(t - t_2)] = \varepsilon[\sigma_1(t - t_1)] + \varepsilon[\sigma_2(t - t_2)] \quad (3.7)$$

onde  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são tensões aplicadas ao material;

$t_1$  e  $t_2$  representam os instantes em que estas tensões foram aplicadas.

O comportamento mecânico do material será dito não-linear se uma das equações, 3.6 e 3.7, não for satisfeita, e para este caso, algumas teorias de viscoelasticidade não-linear são comumente usadas, como: Christensen (1970) e de Schapery (1969) (SOARES e DE SOUZA, 2002). Vale ressaltar que esse modelo não é capaz de representar deformações permanentes.

Existem, porém, algumas dificuldades operacionais para obtenção do Módulo de Relaxação e da Função Fluência a partir de experimentos. Silva (2009) enumera em sua tese algumas dessas dificuldades:

- Aplicação súbita de um nível de deformação constante para o caso de um ensaio de Módulo de Relaxação;

- Impossibilidade de aplicação instantânea de alguma grandeza mecânica (tanto tensão como deformação) em um material viscoelástico.

Tendo em vistas essas dificuldades operacionais, ensaios que consistem na aplicação de um carregamento oscilatório harmônico têm sido investigados (SILVA, 2009). Se o comportamento do material é viscoelástico, a resposta a uma solitação senoidal também será senoidal, mas defasada por certo ângulo de fase ( $\varphi$ ). Seja uma deformação imposta

obedecendo a uma equação senoidal, então a resposta mecânica de um material viscoelástico também é dada por uma equação senoidal, porém defasada no tempo (DE MELLO, 2008):

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \text{sen}(\omega t) \quad (3.8)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (3.9)$$

onde  $\varepsilon_0$  é a amplitude de deformação;

$\sigma_0$  é a amplitude de tensão;

$\omega$  é a frequência angular;

$\varphi$  é o ângulo de fase.

O comportamento está representado na Figura 3-3 por um esquema de ensaio com sollicitação harmônica.

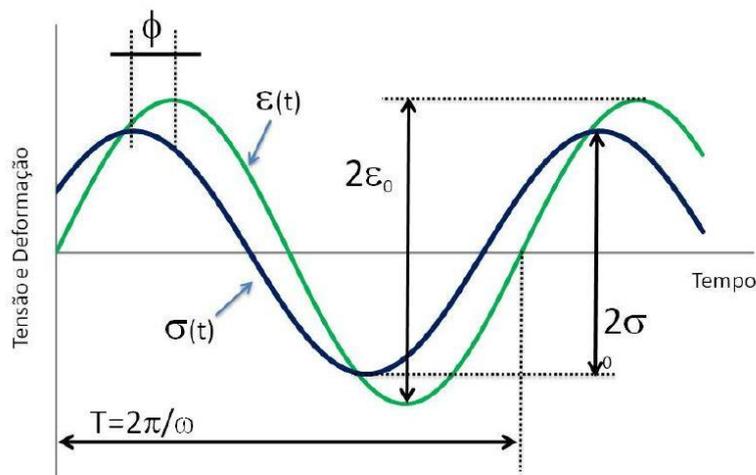


Figura 3-3 – Esquema de uma sollicitação harmônica em um material viscoelástico (DE MELLO, 2008)

São definidas duas parcelas de módulo sem função das amplitudes  $\sigma_0$  e  $\varepsilon_0$ :

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos(\varphi) = |E^*| \cos(\varphi) \quad (3.10)$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \text{sen}(\varphi) = |E^*| \text{sen}(\varphi) \quad (3.11)$$

onde  $|E^*|$  é denominado Módulo de rigidez do material, definido como a razão entre  $\sigma_0$  e  $\varepsilon_0$ ;

$E^*$  é denominado Módulo complexo do material;

$E'$  é denominado Módulo de Armazenamento (*Storage Modulus*);

$E''$  é denominado Módulo de Perda (*Loss Modulus*).

O módulo  $E'$  se refere à parte elástica, onde toda energia fornecida é devolvida em forma de deformação, enquanto que o módulo  $E''$  se refere ao comportamento viscoso, onde, devido às deformações permanentes, toda energia fornecida é dissipada. Sendo assim, a  $\tan(\varphi)$  é referida como uma relação de atrito interno ou amortecimento mecânico segundo Lakes (1998), citado por Theisen (2006). Quando o ângulo de fase for igual a zero ( $\varphi=0^\circ$ ), o material é puramente elástico e não há dissipação de energia; do mesmo modo, se o ângulo de fase for igual a noventa ( $\varphi=90^\circ$ ), o material é puramente viscoso e não existe armazenamento de energia (THEISEN, 2006). Portanto, rigidez do material pode ser tratada com um número complexo, assim surgindo a definição de Módulo Complexo, conforme a seguinte equação:

$$E^* = E' + E''i \quad (3.12)$$

Através de modelos reológicos viscoelásticos, todos os fenômenos explicados até aqui podem ser modelados matematicamente, em função de constantes que podem ser determinadas a partir de análise inversa de resultados de ensaios (THEISEN, 2006).

### 3.4. MODELOS REOLÓGICOS

Segundo Huang (1993), os materiais viscoelásticos possuem as propriedades elásticas de um sólido e a viscosidade de um líquido. Por causa da componente viscosa, o comportamento de materiais viscoelásticos é dependente do tempo, quanto maior o tempo, maior o escoamento. O CAP é um material viscoelástico, e por isso tem seu comportamento descrito por teorias viscoelásticas. Existem muitos modelos mecânicos para descrever o comportamento viscoelástico.

Os modelos partem do princípio de uma mola totalmente elástica, que segue a lei de Hooke (com  $E$  como módulo de elasticidade) e de um amortecedor que segue a lei de Newton com resposta totalmente viscosa (com  $\eta$  como módulo de viscosidade). A partir desses dois elementos simples, são criadas cadeias de associações em série e/ou paralelo, de acordo com o material que será descrito; adicionando-se mais molas para aumentar a parcela elástica do material, ou adicionando mais amortecedores para aumentar a parcela viscosa do material. A Figura 3-4 representa os modelos de Maxwell, Kelvin e Burgers, respectivamente. O trabalho será limitado a esses modelos, por serem suficientes para atingir o objetivo final.

As leis que caracterizam os dois materiais, a mola e o amortecedor, são descritas pelas equações seguintes, respectivamente.

$$\sigma_e = E \varepsilon_e \quad (3.12)$$

$$\sigma_v = \eta \frac{d\varepsilon_v}{dt} \quad (3.13)$$

onde  $E$  é o módulo de elasticidade;

$\eta$  é o coeficiente de viscosidade do fluido;

$\sigma_e$  é a tensão solicitante referente a parcela elástica;

$\sigma_v$  é a tensão solicitante referente a parcela viscosa;

$\varepsilon_e$  é a deformação referente a parcela elástica;

$\varepsilon_v$  é a deformação referente a parcela viscosa;

$t$  é o tempo.

Nos próximos tópicos serão descritos os modelos de Maxwell, Kelvin e Burgers.

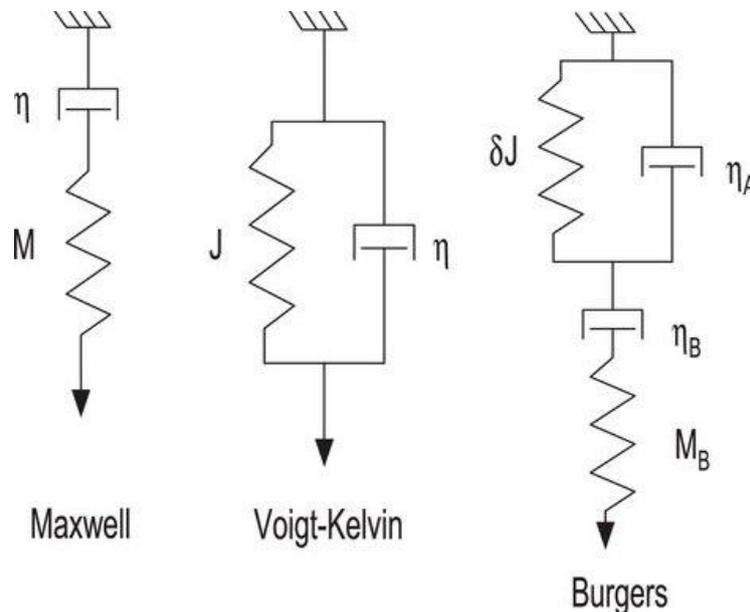


Figura 3-4 – Modelos Mecânicos para Materiais Viscoelásticos (HENNING *et al.*, 2009)

### 3.4.1. MODELO DE MAXWELL

O modelo de Maxwell consiste na associação em série de uma mola e um amortecedor, conforme a Figura 3-4 (a). Assim, a tensão  $\sigma$  e deformação  $\varepsilon$  são divididas entre ambos os elementos; sendo que na mola a deformação é instantânea após aplicação da tensão

porque o módulo de elasticidade não é uma variável dependente do tempo, como mostra a equação (3.12). Já no amortecedor a deformação acontece ao longo do tempo, como mostra a equação (3.13). Sendo assim, o comportamento da unidade pode ser descrito pelas equações :

$$\sigma = \sigma_e = \sigma_v \quad (3.14)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_v \quad (3.15)$$

onde  $\sigma_e$  é a tensão solicitante referente a parcela elástica;

$\sigma_v$  é a tensão solicitante referente a parcela viscosa;

$\varepsilon_e$  é a deformação referente a parcela elástica;

$\varepsilon_v$  é a deformação referente a parcela viscosa.

Combinando as equações 3.12, 3.13, 3.14 e 3.15, é deduzida a relação tensão-deformação básica para o modelo de Maxwell, expressa pela seguinte equação:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E_0} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta_0} \sigma \quad (3.16)$$

onde  $E_0$  é o módulo de elasticidade de um elemento Maxwell;

$\eta_0$  é o coeficiente de viscosidade de um elemento Maxwell;

$\varepsilon$  é a deformação.

O primeiro termo do lado direito da equação (3.16) é referente à taxa de tensão da mola e o segundo termo referente ao amortecedor. Se a deformação for mantida constante,  $d\varepsilon/dt$  é igual à zero, ou então após a integração obtém-se a seguinte equação :

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{T_0}\right) \quad (3.17)$$

onde  $T_0$  é o tempo de relaxação de um elemento Maxwell.

Já definindo uma unidade do elemento de Maxwell, é possível, então, associar várias unidades em paralelo, obtendo o chamado Modelo Generalizado de Maxwell. Nesse caso, a tensão  $\sigma$  será a soma das tensões em cada um dos elementos de Maxwell, onde todos têm a mesma deformação  $\varepsilon$ . Como o modelo generalizado de Maxwell é utilizado na maioria das vezes para modelagens na área de dinâmica dos fluídos, não será descrito a equação construtiva do modelo generalizado de Maxwell (THEISEN, 2006).

### 3.4.2. MODELO DE KELVIN

O modelo de Kelvin tem sua unidade definida por um conjunto de uma mola e um amortecedor associado em paralelo, como mostrado na Figura 3-4 (b). Essa associação, diferentemente da de Maxwell, impõe uma mesma deformação, já que para a mola deformar ela tem que levar junto o amortecedor, dividindo a tensão assim entre ambos os elementos. Isso impõe as relações entre os elementos do modelo de Kelvin descritas pelas equações:

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_v \quad (3.18)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_e = \varepsilon_v \quad (3.19)$$

Sendo assim, pode-se modelar o comportamento tensão-deformação dessa unidade utilizando as equações 3.12, 3.13, 3.16 e 3.17, obtendo assim a relação básica para o modelo de Kelvin conforme a equação seguinte:

$$\sigma = E_1 \varepsilon + \eta_0 \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3.20)$$

onde  $E_1$  é o módulo de elasticidade de um elemento Kelvin;

$\eta_1$  é o coeficiente de viscosidade de um elemento Kelvin.

Como visto no modelo de Maxwell, a primeira parcela da direita da equação (3.20) é devido à mola e a parcela da direita devido ao amortecedor. Se uma tensão constante é aplicada, a equação 3.20 pode ser substituída por:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) \right] \quad (3.21)$$

onde  $E_1$  é o módulo de elasticidade da mola de um elemento Kelvin;

$T_1$  é o tempo de retardação de um elemento Kelvin ( $\eta_1/E_1$ ).

Do mesmo modo que o modelo de Maxwell pode ser associado, os elementos do modelo de Kelvin podem ser associados em série, obtendo-se desta forma o chamado Modelo Generalizado de Kelvin. Assim sendo, a deformação  $\varepsilon$  é a soma das deformações de cada elemento do modelo de Kelvin sob uma tensão  $\sigma$ . Isolando  $\varepsilon$  na equação 3.20, a deformação é obtida e assim expressa;

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma}{E_i + \eta_i \frac{d}{dt}} \quad (3.22)$$

onde  $\varepsilon_i$  é a deformação de um elemento  $i$ ;

$\sigma$  é a tensão;

$E_i$  é módulo de elasticidade de um elemento  $i$ ;

$\eta_i$  é o coeficiente de viscosidade do elemento  $i$ .

Realizando-se o somatório de 1 a  $n$  parcelas expressas pela equação 3.22, obtém-se a relação tensão-deformação do modelo generalizado de Kelvin na equação:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma}{E_i + \eta_i \frac{d}{dt}} \quad (3.23)$$

Theisen (2006) afirma que o modelo generalizado de Kelvin é o mais adequado para descrição de deformações de materiais viscoelásticos quando estes são submetidos a tensões, devido à resposta se assemelhar ao comportamento de fluência observado experimentalmente nesses materiais (Barbosa, 1979; Gibson *et al.*, 2003; Abbas, 2004; Souza, 2005). Contudo, será apresentando no item 3.3.3. o modelo de Burgers que descreve melhor qualitativamente o comportamento de materiais viscoelásticos, segundo Huang (1993).

### 3.4.3. MODELO DE BURGERS

O modelo de Burgers consiste na associação em série dos modelos de Maxwell e Kelvin. A forma dos elementos está representada na Figura 3-4 (c). A partir das equações 3.16 e 3.20 e sob uma tensão constante, a seguinte equação é encontrada:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} \left( 1 + \frac{t}{T_0} \right) + \frac{\sigma}{E_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) \right] \quad (3.24)$$

onde  $E_0$  é o módulo de elasticidade da mola de um elemento Maxwell,

$T_0$  é o tempo de relaxação de um elemento Maxwell

$E_1$  é o módulo de elasticidade da mola de um elemento Kelvin;

$T_1$  é o tempo de retardação de um elemento Kelvin ( $\eta_1/E_1$ ).

A deformação total é composta por três partes: uma deformação instantânea elástica, uma deformação viscosa e uma deformação elástica retardada.

### 3.5. REÔMETRO DE CISALHAMENTO DINÂMICO

Por meio do ensaio realizado com o Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (*Dynamical Shear Rheometer – DSR*) é possível medir o módulo complexo de cisalhamento ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\varphi$ ), submetendo uma pequena quantidade de ligante a tensões de cisalhamento

oscilatórias, entre duas placas, sendo uma delas fixa. O módulo complexo e o ângulo de fase podem ser definidos por:

$$G^* = \frac{\tau_{máx}}{\varepsilon_{máx}} \quad (3.25)$$

$$\varphi = \omega (\Delta t) \quad (3.26)$$

onde  $G^*$  é o módulo complexo de cisalhamento dinâmico;

$\tau_{máx}$  é a máxima tensão de cisalhamento aplicada;

$\varepsilon_{máx}$  é a máxima deformação devido à tensão de cisalhamento aplicada;

$\varphi$  é o ângulo de fase;

$\omega$  é a frequência angular;

$\Delta t$  é o tempo de defasagem.

Na Figura 3.3 é possível observar o carregamento solicitante e a deformação devido a tensão aplicada, assim como a máxima tensão de cisalhamento e a máxima deformação devido à tensão de cisalhamento.

### 3.6. CURVAS MESTRAS

Para se calcular o fator de translação horizontal  $\alpha_T$  (*shift factor*), escolhe-se uma determinada temperatura de referência ( $T_R$ ) e deslocam-se horizontalmente as demais curvas para o estado térmico da temperatura de referência. Este fator pode ser calculado através da de Arrhenius (SILVA, 2009):

$$\log(\alpha_t) = C \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \quad (3.19)$$

onde  $\alpha_T$  é o fator de deslocamento horizontal (*shift factor*) para a temperatura de ensaio  $T$  em relação à temperatura de referência  $T_R$ ;

$T_R$  é a temperatura de referência;

$C$  é uma constante da equação de Arrhenius, particular de cada material.

A constante da equação de Arrhenius é proporcional a Energia de Ativação de Fluxo ( $E_a$ ) e é dada por:

$$C = \frac{434,2 E_a}{R} \quad (3.20)$$

onde  $E_a$  é a energia de ativação de fluxo, característica de cada material viscoelástico;  $R$  é a constante universal dos gases.

Outra equação que segundo Kim (2006) se ajusta muito bem na composição de curvas mestras para misturas asfálticas é a equação de WLF proposta por Williams *et al.* (1955). É uma relação puramente empírica para sistemas poliméricos gerais e é expressa por:

$$\log(\alpha_T) = \frac{C_1(T-T_R)}{C_2+T-T_R} \quad (3.21)$$

onde  $C_1$  e  $C_2$  são constantes empíricas da equação de WLF, características de cada material viscoelástico.

Silva (2009) traz alguns valores citados por diversos autores da constante de Arrhenius, Tabela 3-1, e para as constantes de WLF, Tabela 3-2, para as equações 3.19 e 3.21, respectivamente. Devido à heterogeneidade das misturas asfálticas, métodos numéricos ou adaptações das equações analíticas devem ser utilizados, já que dificilmente existirá uma equação analítica capaz de descrever um fator de translação para todas as temperaturas de ensaio.

Tabela 3-1 – Constantes de Arrhenius típicas de misturas asfálticas (SILVA, 2009)

Fonte	Energia de Ativação $E_a$ (kJ/mol)	C (K)	Material
CHRISTENSEN JR. e ANDERSON (1992)	261	13.631	Mistura Asfáltica
LYTON <i>et al.</i> (1993)	-	13.060	Mistura Asfáltica
MEDANI e HUURMAN (2003)	196	10.237	Mistura Asfáltica
JACOBS (1995)	-	7.680	Mistura Asfáltica

Tabela 3-2 – Constantes de WLF típicas de sistemas poliméricos e misturas asfálticas (SILVA, 2009)

Fonte	$C_1$	$C_2$ (K)	Material
FERRY (1980)	-8,86	101,6	Sistemas Poliméricos em geral
SAYEGH (1967)	-9,5	95	Mistura Asfáltica
LYTON <i>et al.</i> (1993)	-19	92	Mistura Asfáltica
MEDANI e HUURMAN (2003)	-12	102	Mistura Asfáltica

Outro processo para a determinação dos fatores de translação é o ajuste de uma função sigmoidal, dada por (DE MELLO, 2008):

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\vartheta}{1 + \exp(\beta + \gamma \log(\frac{1}{\omega_r}))} \quad (3.22)$$

$$\log \alpha_T(T_i) = a T_i^2 + b T_i + c \quad (3.23)$$

onde  $\delta$ ,  $\vartheta$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são coeficientes da função;

$\omega_r$  é a frequência reduzida;

$\alpha_T$  é o fator de translação;

$a$ ,  $b$  e  $c$  são coeficientes determinados durante a construção da Curva Mestra.

O fator de translação é função da temperatura e é definida pela equação 3.24 (DE MELLO, 2008).

$$\alpha_T = \frac{t}{t_r} = \frac{\omega_r}{\omega} \quad (3.24)$$

onde  $t$  é o tempo de carregamento em uma temperatura de interesse;

$T_r$  é o tempo de carregamento na temperatura de referência;

$\alpha_T$  é o fator translação função da temperatura.

O módulo dinâmico é obtido através de uma solicitação com frequência imposta, diferentemente dos ensaios de relaxação e fluência, que são obtidos no domínio do tempo. Com o valor do módulo dinâmico é possível obter os módulos de relaxação e fluência através de uma interconversão. A equação 3.25 permite obter, a partir do módulo de armazenamento obtido nos ensaios de módulo dinâmico, o módulo de relaxação.

$$E(t) \cong \frac{1}{\lambda'} E'(\omega)|_{(\omega=(1/t))} \quad (3.25)$$

sendo que:

$$\lambda' = \Gamma(1 - m) \cos(m \frac{\pi}{2}) \quad (3.26)$$

onde  $E(t)$  é o módulo de relaxação;

$\Gamma$  é a função Gamma;

$m$  é a inclinação na parte linear da Curva Mestra no espaço log-log;

$E'$  é o módulo de armazenamento.

A Figura 3-5 a seguir apresenta um exemplo da construção de uma curva mestra para uma temperatura de referência de 21°C através da translação horizontal.

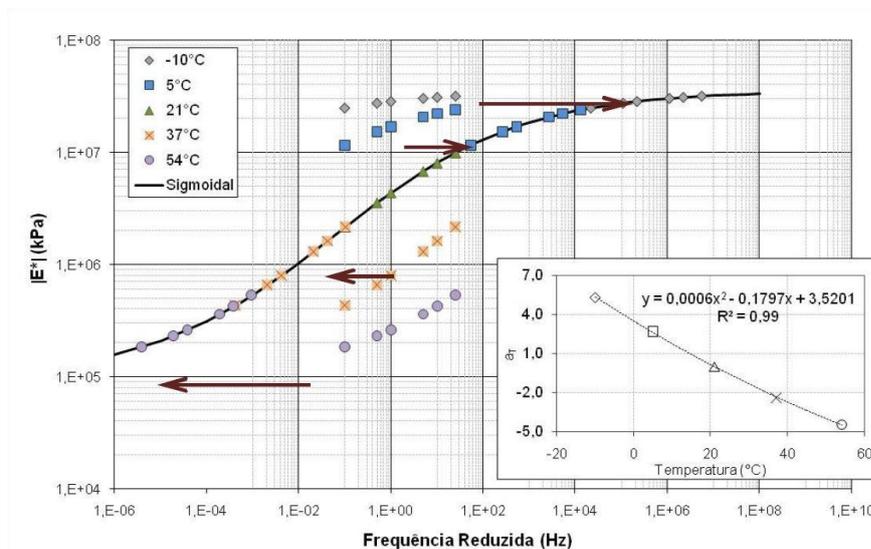


Figura 3-5 – Exemplo de Curva Mestra e aplicação do *Shift Factor* (DE MELLO, 2008)

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Tendo em vista o estudo das propriedades reológicas somente do asfalto ou do mástique, resolveu-se então utilizar um material que substituísse os agregados nas misturas asfálticas e que tivesse propriedades conhecidas e constantes. Em uma primeira tentativa, foram utilizadas bolinhas de gude como substitutas do agregado. Para que houvesse o consumo mínimo de asfalto, foi utilizada a fórmula da superfície específica para esferas, e a fórmula do teor de asfalto de acordo com a superfície específica das partículas. Depois de realizada a mistura, uma tentativa de compactação no molde Marshall foi realizada, porém com o número de golpes reduzidos para não houvesse quebra das bolinhas de gude. Quando retirado do molde, as bolinhas simplesmente escorreram, já que o volume de vazios era muito grande e o contato entre cada bolinha era mínimo e pontual com uma camada de asfalto.

Por isso, foi utilizado fíler para preencher os vazios e uma segunda tentativa foi realizada. Dessa vez as bolinhas não escorreram, mas o corpo de prova não poderia ser utilizado para ensaio já que sua superfície era muito irregular. Sendo assim, a solução encontrada foi utilizar uma mistura que preenchesse os vazios e ao mesmo tempo não interferisse nas propriedades do corpo de prova durante o ensaio de *creep* estático. O critério

de escolha foi principalmente o tamanho das partículas na mistura e a densidade para que a mistura fosse a mais fechada o possível. Resolveu-se então adotar a Areia Asfalto Usinada a Quente (AAUQ) na faixa B do DNIT 032/2005 – ES.

Um terceiro corpo de prova foi produzido, utilizando a areia asfalto para preencher os vazios das bolinhas de gude. Mesmo assim, o número de golpes foi menor que o recomendado para a compactação Marshall para evitar a quebra das bolinhas. Após a confecção do terceiro corpo de prova (CP3), foi realizado o capeamento para que as duas faces ficassem paralelas e o CP3 foi submetido ao ensaio de *creep* estático. Após a realização do ensaio, o CP3 ficou na estufa a 130 °C durante uma hora e meia para que fosse possível realizar a desagregação dos materiais para observar o índice de quebra das bolinhas de gude. O resultado pode ser visto na Figura 4-1.



Figura 4-1 – Condição das bolinhas de Gude no CP3 após ensaio de Fluência

Como não foi possível saber quanto da energia de compactação foi efetivamente para a mistura como um todo e quanto dessa energia foi dissipada com as bolinhas de gude, além de não saber se a quebra ocorreu durante a compactação ou durante o ensaio, a ideia de utilizar bolinhas de gude foi deixada de lado e adotou-se então o AAUQ faixa B como material padrão para os estudos realizados nesse trabalho.

Excepcionalmente não foi possível utilizar o Reômetro para poder realizar a segunda parte de ensaios para poder obter os parâmetros do modelo viscoelástico. Todavia esses parâmetros foram retirados do ensaio de fluência estática e a simulação realizada sem grandes problemas.

#### 4.1. MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Independentemente do tipo da mistura, todas as misturas asfálticas possuem pelo menos dois componentes principais: o ligante asfáltico e os agregados. Sendo assim, a seguir, será descrito quais componentes foram usados neste trabalho e como foram avaliadas as características importantes para esta pesquisa.

O ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/70, já utilizado em diversas pesquisas e, portanto, já bastante estudado neste laboratório. Ele é proveniente da Centro – Oeste Asfaltos e satisfaz aos requisitos mínimos das especificações da ANP (Tabela 2-1 deste trabalho). Para avaliar a viscosidade, foi utilizado o ensaio de viscosidade Brookfield com os spindles 21 e 27 (SP 21 e SP 27) e os resultados do ensaio são apresentados na Tabela 4-1, conforme encontrado no trabalho de Juan (2014).

Tabela 4-1 – Ensaio de viscosidade Brookfield das misturas de referência (MARTINEZ, 2014)

Misturas de referência	Viscosidade Brookfield (cP)		
	135 °C	150 °C	177 °C
CAP 50/70 Teórica SP-21	274	112	57
CAP 50/70 SP-21 PETROBRAS	350	176	66
CAP 50/70 SP-21	350	170	68
CAP 50/70 SP-27	440	180	60

O agregado chega a corresponder a 95% do peso total de uma mistura asfáltica, e desse modo foram realizados ensaios para a caracterização desses materiais. O agregado utilizado nesse trabalho estava disponível no laboratório por ter sido utilizado em outros trabalhos e é bem característico da região do Distrito Federal. O agregado é proveniente da britagem de rocha calcária, e não é o mais ideal para a utilização na pavimentação; porém devido à predominância deste tipo de agregado associada à escassez de materiais convencionalmente usados em pavimentação, faz com que as rochas calcárias sejam a única opção economicamente viável de agregados destinados à realização de revestimentos para a pavimentação no Distrito Federal.

Parâmetros mínimos para a utilização desses agregados já foram determinados por pesquisas anteriores, como, por exemplo, Juan (2014) e o agregado atende a todas as

especificações da DNER ES 386/99. Porém, alguns ensaios específicos necessários para a dosagem e para a modelagem numérica dos corpos de prova foram realizados, dentre eles: granulometria do material bruto, massa específica real de agregados miúdos (DNER ME084/95), massa específica real de material finamente pulverizado pelo Frasco de *Le Chatelier* (DNER ME 085/94).

Além do agregado de origem material, para poder fazer uma modelagem numérica que representasse qualquer situação, foram utilizadas microesferas de vidro da fabricante Potters, fornecidas pela empresa Só Esferas LTDA na mesma granulometria da faixa B da Areia Asfalto. Os ensaios de caracterização desse material foram os mesmos utilizados no material mineral. As especificações se encontram na Tabela 4-2.

Tabela 4-2 – Especificações Gerais das Microesferas de Vidro

<b>Plotters Tipo</b>	<b>Peneira ASTM</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Esfericidade (%min)</b>
<b>A-205</b>	8 – 12	2,3 – 1,7	80
<b>A-170</b>	10 – 14	2,0 – 1,4	80
<b>A-120</b>	14 – 18	1,4 – 1,0	80
<b>A-090</b>	18 – 20	1,0 – 0,8	80
<b>AA</b>	30 – 70	0,600 – 0,212	70
<b>AD</b>	70 – 140	0,212 – 0,106	80
<b>AH</b>	170 – 325	0,090 – 0,045	80

Observa-se que a granulometria é bem distribuída. Além dessas especificações, foram fornecidos alguns dados mais específicos, como:

Gravidade Específica: 2,5 g/cm<sup>3</sup>;

Módulo de Young, 10<sup>6</sup> psi: 10,0;

Módulo de Rigidez, 10<sup>6</sup> psi, 4,3;

Coefficiente de Fricção: 0,9 -1,0.

#### 4.1.1. GRANULOMETRIA

Um dos ensaios mais básico e fundamental para a caracterização dos agregados usados na pesquisa. O material disponível já se enquadrava dentro da faixa de agregado miúdo com a presença de material de enchimento (fíler). O ensaio foi executado por meio do método de ensaio DNER ME 083/98, seguindo os seguintes passos:

- Quarteamento do material;
- Secagem das amostras em estufas a 110 °C;
- Pesagem do material;
- Peneiramento;
- Pesagem da fração retida em cada peneira.

Foi realizado o ensaio de uma parcela de 5869,7 gramas de material bruto e com os resultados foi possível a construção da curva granulométrica, que é plotada com a percentagem passante no eixo das ordenadas e a abertura das peneiras no eixo das abscissas em escala logarítmica, para a completa caracterização dos materiais utilizados nesses trabalhos.

#### 4.1.2. DENSIDADE DO AGREGADO MIÚDO

O método de ensaio consiste em colocar 500 gramas de material seco em um picnômetro rigorosamente limpo de 500 ml e de massa  $A$ , a massa do material mais o picnômetro é designada  $B$ , colocar água até cobrir a amostra com excesso e aquecer o conjunto durante 15 minutos até a completa expulsão do ar aprisionado no material. Após o resfriamento, completar o volume restante até a marca de 500 ml e pesar, designando esse peso como  $C$ ; finalmente limpar o picnômetro e completá-lo somente com água até a marca de referência e o peso medido nessa etapa é designado como  $D$ . O cálculo da massa específica é realizada através da expressão 4.1.

$$D_r = \frac{B-A}{(D-A)-(C-B)} \quad (4.1)$$

onde  $A$  é massa do picnômetro vazio, em gramas;

$B$  é massa do picnômetro com a massa do agregado, em gramas;

$C$  é massa do picnômetro com a massa do agregado e água até 500 ml, em gramas;

$D$  é massa do picnômetro cheio de água, em gramas.

#### **4.1.3. MASSA ESPECÍFICA REAL DO FÍLER**

Para esse ensaio, utiliza-se 60 gramas de material em um frasco chamado de *Le Chtaelier*. O frasco deve ser parcialmente preenchido antes da adição do material até que seja possível realizar uma leitura entre 0 e 1. Após a adição do material, é realizada uma nova leitura, e a Massa específica real do fíler é calculada através da expressão 4.2.

$$\text{Massa específica real} = \frac{M_0}{(L_2 - L_1)} \quad (4.2)$$

Onde  $M_0$  é massa do material seco, em gramas;

$L_1$  é a leitura inicial no frasco, em centímetros;

$L_2$  é a leitura final no frasco, em centímetros.

#### **4.1.4. DOSAGEM DA MISTURA**

Para a dosagem das misturas asfálticas, a definição da curva granulométrica dos materiais é o primeiro passo a ser dado. A partir da curva definida, é possível realizar uma estimativa do teor ótimo de asfalto através da superfície específica dos agregados miúdos e do fíler. Com essas duas definições, foram moldados corpos de prova pela metodologia Marshall, obedecendo aos critérios na especificação da DNER ME 043/95.

##### **4.1.4.1. DEFINIÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA E METODOLOGIA MARSHALL**

A curva granulométrica adotada foi baseada em encontrar o melhor material que pudesse preencher os vazios entre os agregados. Como já descrito no começo desse capítulo, decidiu-se estudar somente esse material utilizado para o preenchimento, tendo em vista que esse material além de ser convencional, já tinha sido caracterizado em outras pesquisas no mesmo laboratório. Além disso, as microesferas de vidro utilizadas também atendem os mesmos requisitos que o agregado mineral.

Logo, adotou-se a faixa B na Tabela 4-3 por o material passar pela menor abertura (2,0 mm), e adotou-se a faixa intermediária entre os limites superiores e inferiores.

Tabela 4-3 – Faixas Granulométricas e Características de Dosagem Recomendadas pelo DNIT para AAUQ com CAP (DNIT 032/2005 – ES)

Peneiras		Porcentagem em massa, passando		
Série	Abertura	A	B	Tolerâncias
ASTM	(mm)	4,75 mm	2,0 mm	
3/8"	9,5	100	–	–
Nº 4	4,8	80–100	100	± 5%
Nº 10	2,0	60–95	90–100	± 4%
Nº 40	0,42	16–52	40–90	± 4%
Nº 80	0,18	4–15	10–47	± 4%
Nº 200	0,075	2–10	0–7	± 3%
Emprego		Revestimento	Revestimento	
Teor de asfalto. % sobre o total da mistura		6,0–12,0	7,0–12,0	
Volume de Vazios, %		3,0–8,0		
Relação betumes/vazios, %		65–82		

Vale ressaltar que as características de dosagem na Tabela 4-3 se referem à compactação Marshall com 75 golpes que foi utilizada em todos os corpos de prova confeccionados durante este trabalho, com exceção aos CP1, CP2 e CP3. Como o objetivo da pesquisa é estudar as propriedades viscoelásticas de asfaltos e sua modelagem numérica, a busca pelo teor ótimo assim como as melhores propriedades mecânicas não foi o foco durante os procedimentos de confecção das misturas asfálticas. Buscou-se um teor ótimo teórico e a melhor metodologia para que os resultados do *creep* estático tivessem a maior reprodutibilidade possível.

A metodologia Marshall fundamenta-se na norma do DNE ME 043/95 e se estabelece em cinco passos descritos a seguir:

- I. Caracterização dos Materiais;
- II. Determinação das Temperaturas do Ensaio;
- III. Estimativa do Teor Ótimo de Asfalto T (%);
  - a. Conformação dos grupos dos CPs: 3 CPs
- IV. Confecção dos Corpos de Prova (CPs);
  - a. Aquecimento dos materiais segundo as temperaturas de ensaios;

- b. Compactação (75 golpes de cada lado);
- V. Parâmetros de Dosagem;
- a. Densidade Aparente dos CPs;
  - b. Densidade Máxima Teórica (DMT);
  - c. Volume de Vazios ( $V_v$ );
  - d. Volume com Betume (VCB);
  - e. Volume Agregado Mineral (VAM);
  - f. Estabilidade Marshall;
  - g. Ensaio Marshall;
  - h. Fluência Marshall.

Para este trabalho, foram adotados todos os passos até o item *e* do quinto passo. A partir do quinto item, realizou-se o ensaio de *creep* estático (NCHRP report 465 *Appendix C*) e foi verificado se os resultados dos corpos de prova eram semelhantes. Caso ocorresse uma diferença muito grande, novos corpos de provas eram confeccionados buscando alterar o que pudesse interferir no resultado do *creep*.

#### **4.1.4.2. OBSERVAÇÕES SOBRE AS ETAPAS DA METODOLOGIA MARSHALL**

Cabe neste espaço ressaltar algumas observações quanto a alguns passos adotados nesta pesquisa.

##### ***Temperatura de Ensaio***

O ligante utilizado neste trabalho é o mesmo ligante utilizado em vários outros trabalhos realizados neste laboratório, e toda a sua caracterização já foi realizada. Segundo a metodologia Marshall, a temperatura de aquecimento do ligante ( $T_{lig}$ ) para mistura com os agregados é aquela na qual apresenta uma viscosidade cinemática de  $170 \pm 20$  cSt; e a temperatura de compactação ( $T_{comp}$ ) da mistura é aquela na qual o ligante apresenta uma viscosidade cinemática de  $280 \pm 30$  cSt (DNER ME 045/95). O agregado deve estar a uma temperatura entre 10 a 15 °C maior que a temperatura de aquecimento do ligante ( $T_{lig}$ ).

Logo, para se determinar essas temperaturas é preciso construir um gráfico com a viscosidade do ligante *vs* a temperatura. Com os dados do gráfico, é possível determinar a faixa limite para as temperaturas. O controle da temperatura é realizado com um termômetro infravermelho do fabricante Minipa e com faixa de -30 °C a 550°C. Com dúvidas sobre as

leituras realizadas por esse termômetro, para os últimos cinco CPs foi comprado um novo termômetro, do mesmo modelo, para que o controle de temperatura fosse mais preciso.

Com base nos dados fornecidos por outros trabalhos, as temperaturas ficaram definidas na Tabela 4-4.

Tabela 4-4 – Temperaturas durante as etapas de confecção dos CPs

<b>Temperaturas de aquecimento</b>	<b>°C</b>
<b>T<sub>ligante</sub></b>	150 ± 3
<b>T<sub>mistura</sub></b>	165 ± 2
<b>T<sub>compactação</sub></b>	140 ± 2

### *Mistura*

As cinco primeiras misturas foram preparadas manualmente, tendo em vista o melhor controle da distribuição das bolinhas de gude na mistura. Porém, ao abandonar a ideia das bolinhas de gude, a mistura dos CPs 4 e 5 se mostrou muito difícil de realizar manualmente. A partir disso, adotou-se o misturador mecânico com capacidade para dois quilos de mistura por vez, capacidade além da necessária (1200 gramas pela metodologia Marshall).



Figura 4-2 – Misturador mecânico utilizado para a realização das misturas

### ***Compactação***

A compactação foi escolhida para atender aos critérios da Taabela 4-2, que exige a aplicação de 75 golpes com o compactador Marshall. Os três primeiros corpos de prova, por serem formados por bolinhas de gude, tiveram a sua compactação manual, não atingindo os 75 golpes necessários para o método Marshall. Todos os outros CPs foram compactados utilizando um compactador mecânico, com 75 golpes em cada face conforme a metodologia.



Figura 4-3 a) compactador manual com molde Marshall; b) compactador mecânico

#### **4.1.4.3. DEFINIÇÃO DO TEOR ÓTIMO**

O teor provável pode ser estimado a partir da granulometria da mistura de agregados. Esta definição depende da superfície específica da granulometria escolhida. A superfície específica pode ser determinada a partir da expressão 4.3, apresentada a seguir.

$$S = \frac{0,17*G+0,33*g+2,3*A+12*a+135*f}{100} \quad (4.3)$$

onde  $S$  é a superfície específica em  $m^2/kg$ ;

$G$  é a porcentagem retida na # 9,5 mm;

$g$  é a porcentagem que passa na # 9,5 e fica retida na # 4,8 mm;

$A$  é a porcentagem que passa na # 4,8 e fica retida na # 0,297 mm;

$a$  é a porcentagem que passa na # 0,297 e fica retida na # 0,075 mm;

$f$  é a porcentagem que passa na # 0,075 mm.

A partir da superfície específica calculada é possível determinar o teor provável em relação à massa de agregado pela expressão 4.4.

$$T_{ca} = m * S^{\frac{1}{5}} \quad (4.4)$$

onde  $S$  é a superfície específica;

$m$  é o módulo de riqueza (variando entre 3,75 – 4,00);

$T_{ca}$  é o teor provável em relação a massa de agregado.

Como já descrito neste capítulo, buscou-se avaliar as propriedades viscoelásticas do asfalto, e por isso, apesar de ter calculado o teor provável de ligante, foi utilizado um valor intermediário determinado na Tabela 4-2 (8,5%).

#### 4.1.4.4. PARÂMETROS DE DOSAGEM

Para a realização do ensaio de densidade aparente, foi utilizada a balança hidrostática. A partir da DNER ME 117/94 estabeleceu-se os procedimentos de ensaio com as seguintes alterações: como a mistura é muito fechada, não foi necessário utilizar a parafina. Sendo assim, a expressão para calcular a densidade aparente ficou definida como a expressão 4.5 abaixo.

$$D_{ap} = \frac{M_s}{M_s - M_{sub}} \quad (4.5)$$

A densidade máxima teoria (DMT) corresponde à densidade máxima que a mistura asfáltica pode alcançar caso não houvesse vazios no seu interior (VINICIUS RIBEIRO E SOUZA, 2010). Pode ser calculada a partir das porcentagens de cada um dos componentes da mistura e das densidades relativas destes, segundo a equação 4.6.

$$DMT = \frac{100}{\left( \frac{\%CAP}{d_{cap}} + \frac{\%f}{d_f} + \frac{\%am}{d_{am}} + \frac{\%ag}{d_{ag}} \right)} \quad (4.6)$$

onde  $DMT$  densidade máxima teórica da mistura;

$\% CAP$  é o teor de ligante na mistura;

$\% f$  é a percentagem de fíler na mistura;

$\% am$  é a percentagem de agregado miúdo na mistura;

$\% ag$  é a percentagem de agregado graúdo na mistura;

$d_{CAP}$  é a densidade real de ligante;

$d_f$  é a densidade real de fíler;

$d_{am}$  é a densidade real do agregado miúdo e

$d_{ag}$  é a densidade real do agregado graúdo.

A relação que representa a concentração de volume de ar dentro da amostra compactada é conhecida como volume de vazios da mistura compactada ( $\%V_v$ ), e sua determinação é feita a partir da expressão 4.7.

$$\%V_v = \frac{DMT - d_{ap}}{DMT} * 100 \quad (4.8)$$

Os outros parâmetros volumétricos podem ser calculados a partir dos resultados do DMT e do  $V_v$  através das expressões 4.9, 4.10 e 4.11 a seguir.

$$VCB = \frac{d_{ap} * \%a}{d_{ligante}} \quad (4.9)$$

$$VAM = V_v + VCB \quad (4.10)$$

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \quad (4.11)$$

onde VCB é o volume de vazios com betume;

VAM é o volume de vazios do agregado mineral;

RBV é a relação betume/vazios;

$\%a$  é a percentagem de asfalto na mistura;

$d_{ligante}$  é a densidade real do ligante.

#### 4.1.5. ENSAIO DE *CREEP* ESTÁTICO

O ensaio de *creep* estático é o ensaio mais importante desta pesquisa, tendo em vista que a partir dos resultados deste ensaio é possível realizar a análise numérica e o ajuste da série de *Prony* para o estudo da viscoelasticidade. É um ensaio simples, que consiste na aplicação de uma carga constante e a medição das deformações no tempo a partir da aplicação dessa carga. Dividindo-se as deformações pela tensão constante, obtém-se a função de módulo de fluência. Através desses dados é possível realizar inúmeras análises a partir de modelos de comportamento viscoelásticos já descritos no referencial deste trabalho. A metodologia numérica será descrita no próximo subitem do capítulo quatro.

O procedimento adotado para o ensaio de fluência segue a norma NCHRP report 465 *Appendix C (Static creep/flow time of asphalt concrete mixtures in compression)*. A norma utilizada sugere um processo de três etapas, uma pré carga, um carregamento principal e um descarregamento. A norma recomenda uma aplicação de uma pré-carga de no mínimo de 5 % da carga a ser utilizada no ensaio durante 10 segundos. Para essa pesquisa foi utilizada uma carga de 100 kPa durante 3600 segundos; logo o pré-carregamento é de 5 kPa. A fase de descarregamento dura 900 segundos, para que assim seja possível avaliar a recuperação das deformações viscoelásticas e as deformações plásticas finais.

O ensaio foi realizado a uma temperatura padrão de 25 °C com uma variação de 0,5°C. Para que os corpos de provas atinjam essa temperatura, eles foram colocados na sala com temperatura controlada duas horas antes do ensaio. Os corpos de prova foram preparados utilizando o método do capeamento com calda de cimento para que as faces ficassem perfeitamente paralelas. O processo de preparação do corpo de prova pode ser visto na Figura 4-4.



- b. Através de tabela, com a entrada dos parâmetros reais e imaginários para cada frequência;
  - c. Através dos coeficientes da série de *Prony*, para o domínio da frequência;
  - d. Através dos dados do ensaio de fluência, para o domínio da frequência;
  - e. Através dos dados do ensaio de relaxação, para domínio da frequência;
2. Domínio do Tempo:
- a. Através dos coeficientes da série de *Prony*, para o domínio do tempo;
  - b. Através dos dados do ensaio de fluência, para o domínio do tempo;
  - c. Através dos dados do ensaio de relaxação, para o domínio do tempo.

Dentro da opção de entrada com os dados do ensaio de fluência, tem-se ainda algumas opções:

- I. Dados de ensaio combinados, onde entra os dados de cisalhamento em longo prazo normalizado de fluência ou relaxação, e os dados de deformação volumétrica em longo prazo normalizado de fluência ou relaxação;
- II. Somente os dados de ensaio de cisalhamento, onde entra os dados de cisalhamento em longo prazo normalizado de fluência ou relaxação;
- III. Somente os dados de ensaio de deformação volumétrica, onde entra os dados de deformação volumétrica em longo prazo normalizado de fluência ou relaxação;

Para alcançar os objetivos desta pesquisa, optou-se por transformar os dados de fluência axial para dados de cisalhamento para então entrar na opção do domínio do tempo, dados do ensaio de fluência e entrar em dados do ensaio de cisalhamento. Esse método funcionou para cinco dos nove corpos de prova, enquanto que os outros quatro CPs deram problema no ABAQUS de não convergência dos dados viscoelásticos.

Por isso, resolveu-se então entrar com os coeficientes da série de *Prony* para o domínio do tempo e verificar se o mesmo erro ocorria. A série de *Prony* foi obtida, com o uso do método da colocação, por Liosber Medina, com uso do software MathCad, e usadas neste trabalhos com a sua autorização. Com essas duas metodologias, que serão descritas a seguir, foram obtidos todos os resultados deste trabalho.

#### 4.2.1. CREEP TEST - SHEAR TEST DATA

O software dá opção de entrar com alguns dados gerais, como a densidade, e alguns dados mais específicos como: o módulo de elasticidade (instantânea ou em longo prazo), coeficiente de Poisson e os dados de viscoelasticidade; essas opções podem ser vistas na Figura 4-5.

Para entrar com os dados para descrever o comportamento do material dentro do ABAQUS, existem algumas transformações a serem realizadas em alguns parâmetros. Como resultado do ensaio de fluência, tem-se: *Creep Modulus* (MPa), *Creep Compliance* (1/MPa), além da deformação em função do tempo, da carga aplicada, da temperatura do CP, da leitura dos *LVDT's* em função do tempo. A transformação da função fluência para dados de relaxação é feita a partir de uma transformação quasi-elástica, ou seja, a relaxação é o inverso da função fluência, conforme a expressão 4.12. Essa interconversão é descrita por *Park e Kim* (1999) para materiais fracamente viscoelásticos (PARK e KIM, 1999).

$$E(t)D(t) \cong 1 \quad \text{para } t > 0 \quad (4.12)$$

A partir dos dados de *Creep Modulus*, adotados como  $E(t)$ , foram feitas as transformações nas expressões a seguir:

$$G(t) = \frac{E(t)}{(2*(1+\nu))} \quad (4.13)$$

$$J_s(t) = \frac{1}{G(t)} \quad (4.14)$$

$$j_s(t) = G_0 * J_s(t) \quad (4.15)$$

onde  $G(t)$  é o *shear Modulus*;

$J_s(t)$  é o *shear Compliance*;

$j_s(t)$  é o *Normalized Shear Compliance*;

$\nu$  é o coeficiente de Poisson, adotado como 0,4;

$G_0$  é o módulo de cisalhamento no tempo igual a zero,  $G(t=0)$ .

É preciso ressaltar que algumas simplificações foram realizadas. Como o ensaio não fornece o valor da função fluência no tempo zero, um ajuste exponencial simples foi adotado para extrapolar os dados e calcular esse valor. Além disso, o módulo de Young instantâneo foi calculado a partir do mesmo mecanismo, e o módulo de Young em longo prazo foi adotado

como sendo o módulo de relaxação ao final do ensaio, quando ele alcança o platô de estabilização final.

Finalmente, o Coeficiente de Poisson foi adotado como 0,4 em todos os casos, porque foi realizado um estudo da influência dele sobre os resultados de deslocamento final após a simulação no ABAQUS e concluiu-se que ele não interfere no resultado de deslocamento quando ele variado durante a transformação para o Módulo de Cisalhamento. Na janela das propriedades elásticas onde o programa também pede o valor desse módulo, conforme a Figura 4-5 abaixo, também o valor de 0,4 foi adotado para não haver diferenças entre a simulação dos diferentes corpos de prova.

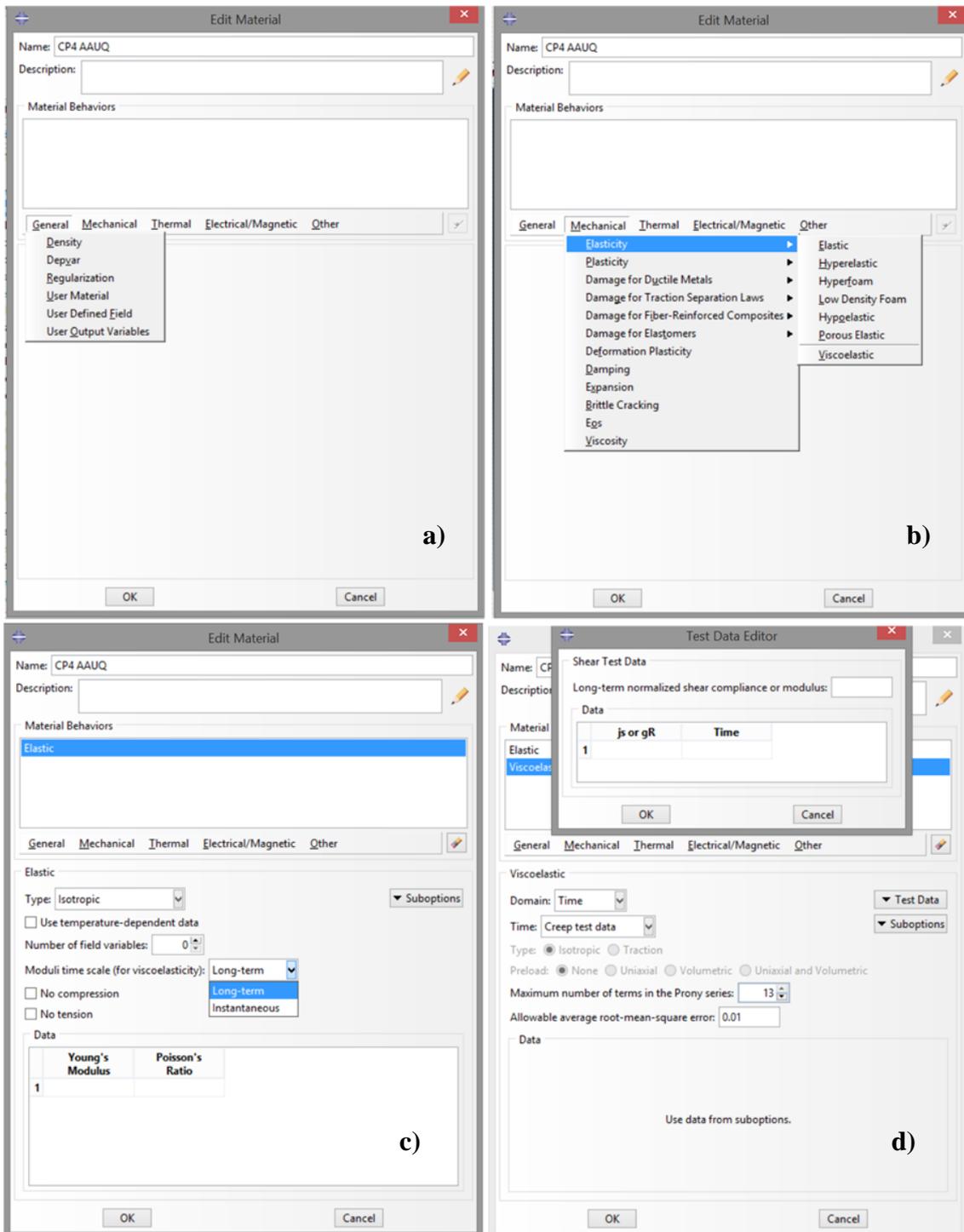


Figura 4-5 – Opções de entrada de comportamento dos materiais no ABAQUS: a) Parâmetros gerais, como, por exemplo, densidade; b) Opções de dados de comportamentos mecânicos; c) Parâmetros de comportamento elástico, por exemplo, Módulo de *Young*; d) Parâmetros de comportamento viscoelástico, com a opção utilizada nesse trabalho: *Shear Test Data*.

A partir dos resultados, no próximo capítulo, será possível verificar que o módulo de Young em longo prazo forneceu os resultados mais próximos dos medidos no ensaio de fluência.

#### 4.2.2. COEFICIENTES DA SÉRIE DE PRONY

Da equação 3.5 deste trabalho, tem-se a série de Prony em função da fluência, representada novamente pela equação 4.16. Em termos do módulo de relaxação, já vista a necessidade para a utilização no ABAQUS, utiliza-se a equação 4.17.

$$D(t) = D_0 + \sum_{i=1}^N D_i \left[ 1 - \exp \left( -\frac{t}{\tau_i} \right) \right] \quad (4.16)$$

$$E(t) = E_e + \sum_{i=1}^N E_i \left[ 1 - \exp \left( -\frac{t}{\rho_i} \right) \right] \quad (4.17)$$

onde  $E(t)$  é o Módulo de Relaxação;

$E_e$  é o Termo Independente da série de Prony;

$E_i$  e  $\rho_i$  são os termos dependentes da série de Prony

Uma pré-suavização dos dados experimentais tem sido proposta para evitar algumas instabilidades numéricas geradas ao se escolher os  $\tau_i$  ou  $\rho_i$  separados por uma década logarítmica, já que é nesse intervalo que variações significativas ocorrem. Foi proposto por Park & Kim (2001) realizar a pré-suavização dos dados experimentais com uma série de lei de potência modificada, demonstrando a eficácia da abordagem com exemplos numéricos. De acordo com os autores (Sousa & Soares, 2007), é possível aplicar esta técnica para determinar as séries de Prony aos dados obtidos dos ensaios de fluência (Creep) para misturas asfálticas no Brasil. No entanto, em âmbito nacional, é usado o Método da Colocação por Mínimos Quadrados Linear (MQL). Esta técnica de MQL é considerada uma técnica de regressão baseada em conceitos estatísticos, que permite fazer estimativas do nível de significância dos parâmetros estimados, portanto é mais robusta. Para o caso do Módulo de Relaxação  $E(t)$ , após a definição da função de mínimos quadrados e derivação em relação às constantes de tempo ( $\rho_i$ , no caso), chega-se à seguinte equação (Silva, 2009):

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M e^{\rho_i} e^{\frac{-t_k}{\rho_i}} E_i = \sum_{k=1}^M (E(t_k) - E_\infty) e^{\frac{-t_k}{\rho_j}} \quad (j=i=1, \dots, N; k=1, \dots, M) \quad (4.16)$$

A equação a seguir explica como obter os termos dependentes da função fluência  $D(t)$  pelo método da colocação por mínimos quadrados lineares.

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \left(1 - e^{-\frac{t_k}{\tau_j}}\right) \left(1 - e^{-\frac{t_k}{\tau_i}}\right) D_j = \sum_{k=1}^M (D(t_k) - D_0) \left(1 - e^{-\frac{t_k}{\tau_i}}\right) \quad (i=j=1, \dots, N; k=1, \dots, M) \quad (4.17)$$

## 5. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste item são mostrados e discutidos os resultados experimentais e numéricos dos ensaios de caracterização do agregado, os resultados fornecidos para o CAP 50/70, os resultados dos ensaios de fluência e os ajustes numéricos. Foram produzidos no total 13 corpos de prova. O resumo com as principais características dos CPs estão na Tabela 5-1 a seguir. A coluna “Leva” é para considerar a ordem de confecção, assim como quais CPs foram fabricados juntos.

Tabela 5-1 – Resumo dos Dados dos Corpos de Provas Confeccionados

	<b>Agregado</b>	<b>Granulometria</b>	<b>Teor de Ligante (%)</b>	<b>Tipo de Mistura</b>	<b>Tipo de Compactação</b>	<b>Leva</b>
<b>CP1</b>	Bolinhas de Gude	-	16,67	Manual	N	1 <sup>a</sup>
<b>CP2</b>	Bolinhas de Gude + Fíler Mineral	-	16,67	Manual	N	1 <sup>a</sup>
<b>CP3</b>	Bolinhas de Gude + Agregado Mineral	-	8,95	Manual	Manual	2 <sup>a</sup>
<b>CP4</b>	Agregado Mineral	AAUQ Faixa B*	8,99	Mecânica	Mecânica	3 <sup>a</sup>
<b>CP5</b>	Agregado Mineral	AAUQ Faixa B*	8,99	Mecânica	Mecânica	3 <sup>a</sup>
<b>CP6</b>	Agregado Mineral	AAUQ Faixa B	8,5	Mecânica	Mecânica	4 <sup>a</sup>
<b>CP7</b>	Agregado Mineral	AAUQ Faixa B	8,5	Mecânica	Mecânica	4 <sup>a</sup>
<b>CP8</b>	Agregado Mineral	AAUQ Faixa B	8,5	Mecânica	Mecânica	4 <sup>a</sup>
<b>CP9</b>	Agregado Mineral	AAUQ Faixa B	8,5	Mecânica	Mecânica	5 <sup>a</sup>
<b>CP10</b>	Agregado Mineral	AAUQ Faixa B	8,5	Mecânica	Mecânica	5 <sup>a</sup>
<b>CP11</b>	Agregado Mineral	AAUQ Faixa B	8,5	Mecânica	Mecânica	5 <sup>a</sup>
<b>CP12</b>	Microesferas de Vidro	AAUQ Faixa B	8,5	Mecânica	Mecânica	6 <sup>a</sup>
<b>CP13</b>	Microesferas de Vidro	AAUQ Faixa B	8,5	Mecânica	Mecânica	6 <sup>a</sup>

Os corpos de prova 1 e 2 foram descartados, pois ao retirar do molde, o primeiro teve um escorrimento, ou seja, ele não sustentou o peso próprio, enquanto que o segundo não apresentava geometria compatível com o ensaio de fluência, com as duas faces planas e paralelas. No segundo corpo de prova, nem mesmo o processo de capeamento poderia regularizar a suas faces.

### 5.1. ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO

Como já dito anteriormente, o ligante asfáltico CAP50/70 já utilizado em diversas pesquisas foi caracterizado várias vezes, sempre apresentando resultados constantes, sem a necessidade de repetição dos ensaios. O resultado pode ser visto no quadro abaixo (QUIÑONES, 2014).

ENSAIOS	UNIDADES	LIMITES			RESULTADOS		METODOS		
		DNIT 095/2006 CAP 50/70	ANP N°39/2008 ASFALTO BORRACHA		CAP 50/70	ASFALTO BORRACHA	ABNT	ASTM	DNER
			AB8	AB22					
Densidade	g/cm <sup>3</sup>				1,002	1,05			ME 193/96
Penetração (100g,5s,25°C)	0,1mm	50-70	30 -70	30 -70	53	42	NBR 6576	D 5	ME003/99
Ponto de amolecimento	°C	≥46	≥50	≥55	47	62	NBR 6560	D36	ME 247/94
Ductilidade a 25°C, mín	cm	≥60			>100	28,5	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Ponto de fulgor mín	°C	>235			325	368	NBR 11341	D 92	ME 148/94
Ponto de combustão	°C				382	410	NBR 11341	D 92	ME 148/94
Recuperação elástica a 25°C, 20 cm, mín			≥50	≥55	7,5	69	NBR 15086	D 6084	ME 382/99
G*/senδ (46°C)	kPa				21,26	38,34			
Viscosidade Brookfield							NBR 15184	D 4402	
a 135°C, Sc 21, 20 rpm, mín	cP	≥274			336	800			
a 150°C, Sc 21, 20 rpm, mín	cP	≥112			170	382			
a 177°C, Sc 21, 20 rpm, mín	cP	57-285			65	170			
a 175°C, Sc 3, 20 rpm, max	cP		800-2000	2200-4000					
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min								D 2872	
Varição em massa, máx	% massa	≤ 0,5	≤1,0	≤1,0	0,15	0,09	NBR 15235	D 2872	
Aumento do ponto de amolec., máx		≤ 8	≤ 10	≤ 10	1,6	2,4	NBR 6560	D 36	
Penetração retida, mín		≥ 55	≥ 55	≥ 55	72	93	NBR 6576	D 5	ME003/99

Quadro 1: Dados do Ligantes Asfáltico. Fonte: (Quiñones, 2014 Modificado)

## 5.2.RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS AGREGADOS

A caracterização do agregado é de fundamental importância na mistura asfáltica, tendo em vista que as misturas desse trabalho apresenta 91,5 % de agregados em relação a massa de cada corpo de prova. Então nesse item serão abordados os resultados do ensaio realizados no agregado utilizado neste trabalho.

### 5.2.1. GRANULOMETRIA DO AGREGADO MINERAL

Um dos ensaios mais básicos, mas não menos importante. A partir desse ensaio é possível já aceitar ou rejeitar um agregado de olho na faixa granulométrica que ele será utilizado. A Tabela 5-2 e a Figura 5-2 apresentam a granulometria do material que foi utilizado na composição da Areia Asfalto Usinada a Quente deste trabalho.

Tabela 5-2 – Granulometria do Agregado Mineral Bruto

Peneira nº	Abertura (mm)	Massa Retida (g)				Porcentual Retido (%)	Massa Passante (g)	Porcentual Passante (%)
		1	2	3	Total			
4	4,8	21	22	15,9	58,9	1,0	5810,8	99,0
10	2	737,3	719,1	749,1	2205,5	37,6	3605,3	61,4
40	0,42	820,7	836,8	740,9	2398,4	40,9	1206,9	20,6
80	0,18	175,2	171,9	145,2	492,3	8,4	714,6	12,2
200	0,075	100,8	99,5	74,9	275,2	4,7	439,4	7,5
Filer		143,3	151,9	144,2	439,4	7,5		
<b>TOTAL</b>		1998,3	2001,2	1870,2	5869,7		5869,7	

Vale ressaltar que durante o ensaio a peneira número 80 não estava disponível, sendo utilizada a peneira 70 em seu lugar. Para o fim deste trabalho, não há necessidade de fazer alterações nas tabelas e nos limites, tendo em vista a pequena diferença que vai ter no resultado final.

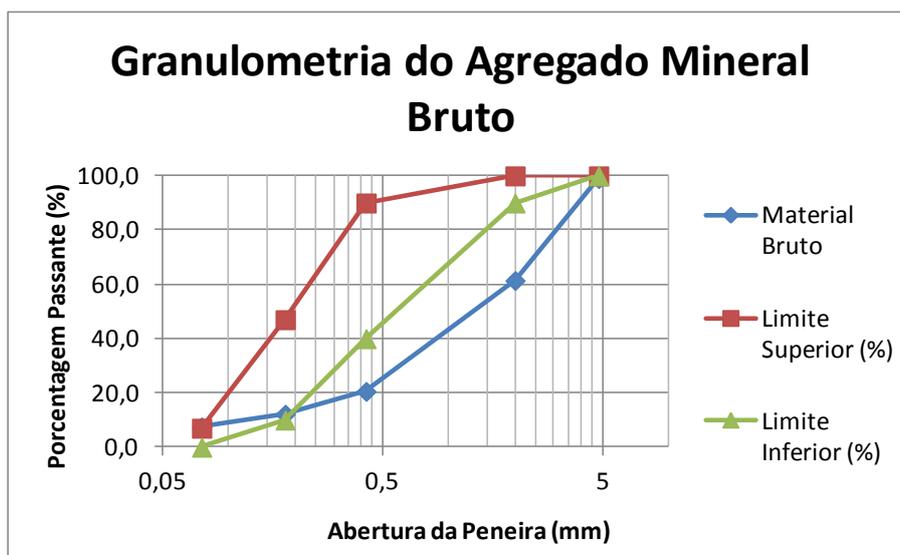


Figura 5-1 – Granulometria do Agregado Mineral Bruto

O agregado apresenta poucas frações retidas nas peneiras que mais precisam (#40 e #80) e por isso muitas seções de peneiramento foram necessárias para que todo material necessário para todos os CPs fosse separado pelo processo de peneiramento. A Tabela 5-3 apresenta os seguintes dados: Limite da faixa superior; Limite da faixa inferior; faixa adotada; tolerância; massa de agregado para cada peneira; Teor de Asfalto adotado; Massa total do CP; Massa de Ligante e Massa de agregado total para cada corpo de prova.

Tabela 5-3 – Limites da Faixa B, faixa adotada, teor de asfalto utilizado e peso de agregado necessário em cada peneira

Peneira	Abertura (mm)	Limite Superior (%)	Limite Inferior (%)	Passando (%)	Retido (%)	Tolerância	Massa de Agregados (g)
4	4.8	100	100	100	0	± 5%	0.0
10	2	100	90	95	5	± 4%	54.9
40	0.42	90	40	65	30	± 4%	329.4
80	0.18	47	10	28.5	36.5	± 3%	400.8
200	0.075	7	0	3.5	25		274.5
Fíler					3.5		38.4
<b>Teor de Asfalto (%)</b>		7	12			± 0,3%	
<b>Teor de Asfalto Adot (%)</b>		8.5				<b>Total</b>	<b>1098</b>
<b>Massa Total (g)</b>		1200					
<b>Massa Agregados (g)</b>		1098					
<b>Massa Asfalto (g)</b>		102					

A Figura 5-3 ilustra os limites da faixa B do DNIT 032/2005 – ES apresentada na Tabela 4-3 e a faixa granulométrica adotada após o processo de separação por peneiramento. É possível ver que a faixa da mistura é intermediária aos dois limites.

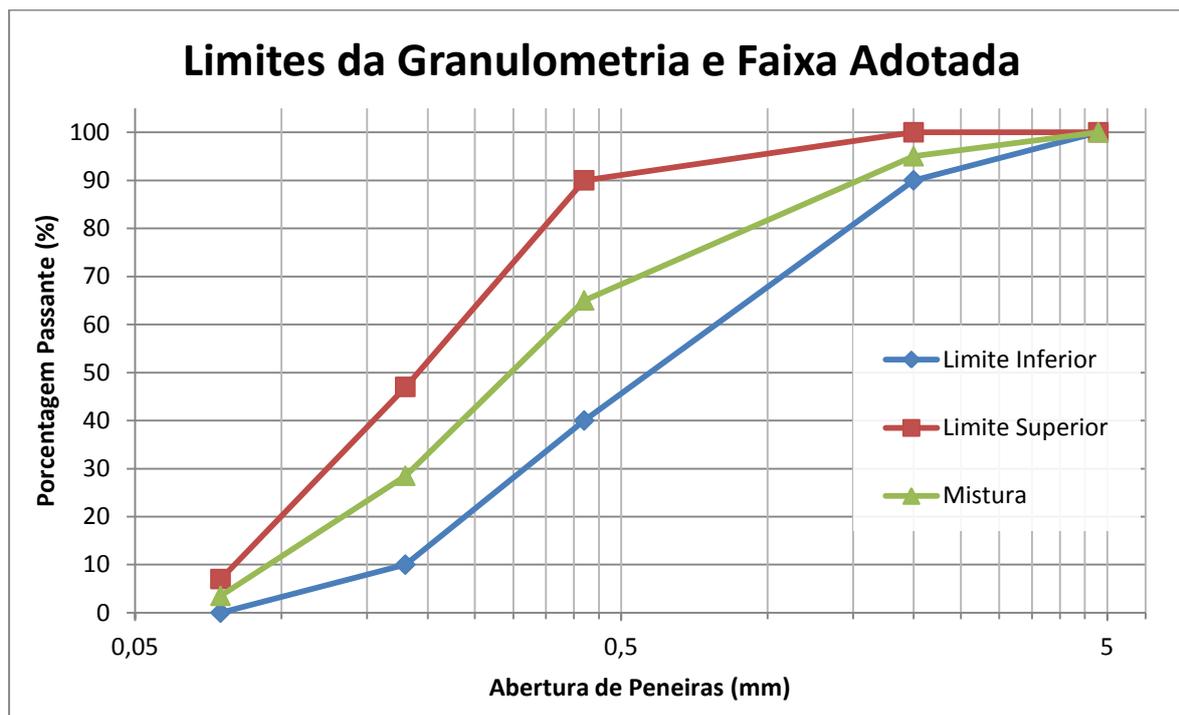


Figura 5-2 – Granulometria adotada após separação no peneiramento

### 5.2.2. GRANULOMETRIA DO AGREGADO DE MICROESFERAS DE VIDRO

Apesar de o agregado de microesferas de vidro apresentar características bem parecidas com as fornecidas pelo fabricante, optou-se por realizar o ensaio de granulometria para que não houvesse uma dispersão de resultados sem alguma explicação. Sendo assim, foi montada a Tabela 5-4 com as distribuições encontradas em cada saco comprado.

Tabela 5-4 – Massa retida (gramas) em cada peneira para as microesferas e Porcentual Final

<b>Peneira</b>	<b>A205</b>	<b>A170</b>	<b>A120</b>	<b>A090</b>	<b>AA</b>	<b>AD</b>	<b>AH</b>	<b>Total (g)</b>
<b>10</b>	32.26	21.49	0.06	0.08	0	0	0	53.89
<b>40</b>	121.7	230.67	172.05	299.7	156.27	1.68	0.5	982.57
<b>70</b>	0	0	0	0	129.84	13.17	0.53	143.54
<b>200</b>	0	0	0	0	7.69	236.88	138.45	383.02
<b>Fundo</b>	0	0	0	0	0.19	33.07	128.44	161.7
<b>Porcentual (%)</b>								
<b>Peneira</b>	<b>A205</b>	<b>A170</b>	<b>A120</b>	<b>A090</b>	<b>AA</b>	<b>AD</b>	<b>AH</b>	<b>Total</b>
<b>10</b>	70.94	28.85	0.12	0.09	0.00	0.00	0.00	100
<b>40</b>	18.63	21.55	23.55	23.56	12.52	0.14	0.04	100
<b>70</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	90.16	9.44	0.40	100
<b>200</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	1.90	60.51	37.59	100
<b>Fundo</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	19.48	80.41	100

Após obter os resultados da granulometria, foi montada uma tabela com qual massa utilizar de cada saco para fazer a composição granulométrica de um corpo de prova. Porém, na prática, ela não se mostrou útil tendo em vista que a cada vez que aumentava o tempo de peneiramento, a composição mudava. Logo foi adotado o mesmo tempo utilizado no agregado mineral e a composição foi realizada a partir da separação simples por peneiramento na fração necessária.

### 5.2.3. RESISTÊNCIA

Como o agregado já foi utilizado em outras pesquisas, os dados de resistência do agregado (não importante para essa pesquisa, tendo em vista que não que o CP não será levado a ruptura) foram retirados das pesquisas que utilizaram esse agregado. Basicamente foram realizados dois ensaios: abrasão no aparelho de *Los Angeles* (DNER ME 035/98) e impacto no aparelho de Treton (DNER ME 399/99) (VINICIUS RIBEIRO E SOUZA, 2010). O resultado encontra-se na Tabela 5-5 abaixo.

Tabela 5-5 – Ensaio de Abrasão Los Angeles e Choque Treton

Abrasão Los Angeles			Choque Treton	
Massa inicial (g)		Densidade do agregado (g/cm <sup>3</sup> )	Faixa de enquadramento = B	
Calculada	135,2	2,704	Massa Total (g) = 5004,3	
Pesada	Amostra 1	$T = \frac{M_r}{M_1} \cdot 100 = 82,90\%$	Massa retida # 1.7mm (g) = 4090,9	
	Amostra 2		$A_n = \frac{m_n - m_n^*}{m_n} \cdot 100 = 81,75\%$	
Massa retida na # 1,70 mm (g)				
Pesada	Amostra 1			
	Amostra 2			
<b>Perda por choque =</b> 17,10%		<b>Perda por abrasão =</b> 18,25%		
Obs.: M <sub>r</sub> é a massa original da amostra e M <sub>1</sub> é a massa retida na # 1,7 mm.			Obs.: m <sub>n</sub> é a massa total e m <sub>n</sub> <sup>*</sup> é a massa retida # 1,7 mm	

#### 5.2.4. RESULTADOS DA DENSIDADE

A determinação da densidade é fundamental para a determinação do teor de projeto e para poder calcular a Densidade Máxima Teórica (DMT) utilizada para saber se a mistura atende aos requisitos do DNIT 032/2005.

A densidade foi determinada tanto para o material de origem mineral, quanto para as microesferas de vidro. Os ensaios de agregado miúdo já foram realizados com a granulometria da faixa B, para melhor representar a densidade encontrada na mistura. Como são ensaios de densidade real, não foi possível realizar o ensaio de absorção. Os ensaios são apresentados nas Tabelas 5-6, 5-7, 5-8 e 5-9 abaixo.

Tabela 5-6 – Densidade do Agregado Miúdo Mineral

Medida	Picnomêtro	A	B	C	D	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
1	11	176.93	695.04	1007.20	674.36	2.80
2	15	140.62	658.82	965.28	638.21	2.71
3	15	140.67	640.55	956.77	638.38	2.75

Tabela 5-7 – Densidade do Fíler Mineral

Massa Seca (g)	L1	L2	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
60.15	0.3	21.2	2.88

L1 e L2 são as leituras no frasco

Tabela 5-8 – Densidade do Agregado Miúdo Composto por Microesferas de Vidro

Medida	Picnomêtro	A	B	C	D	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
1	5	141.02	641.02	939.12	638.90	2.50
2	15	140.67	640.70	939.08	638.38	2.51

Tabela 5-9 – Densidade do Fíler Composto por Microesferas de Vidro

Massa Seca (g)	L1	L2	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
60.01	0	24	2.50

*L1 e L2 são as leituras no frasco*

Cabe ressaltar que as microesferas tiveram como resultado uma densidade igual à densidade fornecida pelo fabricante da mesma. Por isso, a granulometria e outras propriedades fornecidas pelo fabricante foram levadas em conta na produção dos dois corpos de prova de microesferas de vidro.

### 5.3. DOSAGEM DA MISTURA TIPO AAUQ

Não foi verificado previamente se as misturas atendiam aos critérios estabelecidos pelo DNIT para o tipo de mistura adotada, já que o intuito da pesquisa não era a avaliação das propriedades estruturais ou mecânica da mistura adotada, e sim a aplicabilidade da teoria da viscoelasticidade linear. Mesmo assim, foram analisados alguns parâmetros de dosagem para poder realizar uma análise no procedimento de confecção dos corpos de prova. Para isso, após a compactação, limpeza do excesso de material e retirada dos CPs dos moldes, medidas de diâmetro, altura, peso seco e peso submerso foram realizadas e os dados estão resumidamente apresentados na Tabela 5-10 abaixo.

Tabela 5-10 – Resumo das Dimensões e Densidade dos Corpos de Prova

CPs	D (mm)	H (mm)	Peso (g)	Densidade Ap (g/cm <sup>3</sup> )
CP3*	103,13	79,26	1371,50	2,338
CP4	103,11	67,85	1269,50	2,269
CP5	102,59	67,48	1253,70	2,265
CP6	102,32	62,95	1133,50	2,214
CP7	102,67	61,58	1127,70	2,224
CP8	102,93	62,16	1139,20	2,215
CP9	103,03	63,26	1150,40	2,201
CP10	102,86	63,05	1141,40	2,203
CP11	102,12	63,92	1143,10	2,203
CP12	102,92	66,78	1128,30	2,070
CP13	101,94	66,50	1106,60	2,050

*D é o Diâmetro, H é a Altura e Densidade Ap é Densidade Aparente*

Com a composição granulométrica, a densidade do ligante, densidades dos agregados miúdos e fíler pode-se fazer o cálculo da Densidade Máxima Teórica. O resultado apresentado na Tabela 5-11 abaixo está dividido entre 1 e 2. O valor 1 é válido somente para os CPs: 6, 7, 8, 9, 10 e 11; enquanto que o valor 2 é válido para o CP4 e CP5.

Tabela 5-11 – Densidade Máxima Teórica (DMT) para o Agregado Mineral

n	%CAP	dcap	%f	df	%am	dam	DMT (g/cm <sup>3</sup> )
1	<b>8,50</b>	1,005	3,20	2,88	88,30	2,75	2,399
2	<b>8,99</b>	1,005	3,19	2,88	87,83	2,75	2,382

*%CAP é a percentagem em massa de Ligante; dcap é a densidade do Ligante; %f é a percentagem em massa do fíler; df é a densidade do fíler; %am é a percentagem em massa do agregado miúdo; dam é a densidade do agregado miúdo.*

Para o CP3, uma conta aproximada foi realizada, tendo em vista que os materiais utilizados (AAUQ + bolinhas de gude) não foram muito controlados na sua execução. O DMT para o CP3 é aproximadamente 2,434 g/cm<sup>3</sup>; considerando que: Porcentagem de Ligante: 5%; Porcentagem de Fíler: 2%; Porcentagem de Agregado Miúdo: 49%; Porcentagem de Bolinhas de Gude: 44% e Densidade das Bolinhas de Gude: 2,5 g/cm<sup>3</sup>. O número de golpes utilizados no CP3 foi de apenas 25 golpes em uma das faces. Mesmo assim, os resultados do CP3 foram incluídos na Tabela 5-12, que apresenta os parâmetros de dosagem para cada corpo de prova.

Tabela 5-12 – Parâmetros de Dosagem para os CPs Feitos com Agregado Mineral

	CP3*	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10	CP11
<b>da</b>	2,338	2,269	2,265	2,214	2,224	2,215	2,201	2,203	2,203
<b>%Vv</b>	3,92	4,73	4,92	7,73	7,32	7,68	8,25	8,20	8,17
<b>VCB</b>	19,78	19,19	19,15	18,72	18,81	18,73	18,62	18,63	18,64
<b>VAM</b>	23,70	23,92	24,07	26,45	26,12	26,42	26,87	26,83	26,80
<b>RBV</b>	83,46	80,21	79,57	70,78	72,00	70,92	69,28	69,44	69,52

*da é a densidade aparente; %Vv é a percentagem do Volume de vazios; VCB é a percentagem do Volume de Vazios com Betume; VAM é o Volume de Vazios do Agregado Mineral; RBV é a relação Betume/Vazios*

O DNIT especifica na DNIT 032/2005 – ES apenas a percentagem de Volume de Vazios (Vv) e a Relação Betume Vazios, na Tabela 4-3 deste trabalho. Esses limites são: %Vv = 3 – 8 e RBV = 65 – 82.

Levando em consideração que:

- I. O CP3 foi realizado com compactação insuficiente e manual;
- II. Os CP4 e CP5 foram produzidos no mesmo dia, com mistura manual e com excesso de material (peso final maior que 1200 gramas exigidos na metodologia Marshall), com compactação mecânica;
- III. Os CP6, CP7 e CP8 foram produzidos no mesmo dia, com misturador mecânico, compactação mecânica e seguindo rigorosamente a quantidade exata de material, controlando as temperaturas de mistura e compactação, porém sem registro físico das mesmas e
- IV. Os CP9, CP10 e CP11 foram produzidos após os resultados do ensaio de fluência dos outros CPs, com misturador mecânico, compactação mecânica e seguindo rigorosamente a quantidade exata de material, controlando as temperaturas de mistura e compactação com registro físico das mesmas.

É possível fazer algumas observações:

- a) Os CP9, CP10 e CP11 apresentam volume de vazios acima do limite da na DNIT 032/2005 – ES; apesar de terem o processo mais rigoroso o possível, considerando todas as variáveis que poderiam ter afetado a confecção dos mesmos;
- b) O CP3 apesar de não ter compactação nem próxima da exigida na metodologia, teve o menor índice de vazios de todos os CPs;
- c) Com exceção do CP3, todos os outros CPs atendem o critério de Relação Betume e Vazios.

O mesmo processo de avaliação dos parâmetros de dosagem foi realizado para os corpos de provas realizados com microesferas de vidro. O resultado da DMT está apresentado na Tabela 5-13, e os parâmetros estão apresentados na Tabela 5-14 para os dois CPs.

Tabela 5-13 – Densidade Máxima Teórica (DMT) para os CPs com Microesferas de Vidro

<b>%CAP</b>	<b>dcap</b>	<b>%f</b>	<b>df</b>	<b>%am</b>	<b>dam</b>	<b>DMT (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>8.5</b>	1,005	3,2025	2,45	88,2975	2,46	2,190

*%CAP é a porcentagem em massa de Ligante; dcap é a densidade do Ligante; %f é a porcentagem em massa do filler; df é a densidade do filler; %am é a porcentagem em massa do agregado miúdo; dam é a densidade do agregado miúdo.*

Tabela 5-14 – Parâmetros de Dosagem para os CPs Feitos com Microesferas de Vidro

	<b>CP12</b>	<b>CP13</b>
<b>da</b>	2,070	2,050
<b>%Vv</b>	5,51	6,40
<b>VCB</b>	17,50	17,34
<b>VAM</b>	23,01	23,74
<b>RBV</b>	76,06	73,04

*da é a densidade aparente; %Vv é a porcentagem do Volume de vazios; VCB é a porcentagem do Volume de Vazios com Betume; VAM é o Volume de Vazios do Agregado Mineral; RBV é a relação Betume/Vazios*

Apesar de utilização de um material que não é tradicional, os dois corpos de prova atendem aos critérios de Volume de Vazios e de Relação Betume Vazios estabelecidos na Tabela 4-3.

#### **5.4.RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O ENSAIO DE FLUÊNCIA**

A seguir, serão mostrados dos dados retirados do ensaio de fluência para todos os corpos de prova, com exceção dos CP1, CP2, CP12 e CP13. Ou seja, os resultados mostrados são os resultados para o agregado mineral, para a granulométrica da Faixa B da norma do DNIT 032/2005 – ES.

No gráfico apresentado na Figura 5-3 é possível ver que a prensa tentar manter os 100 kPa de tensão aplicada. Em alguns corpos de prova essa tensão é um pouco menor que 100, mas não menor que 98 kPa. A partir dessa tensão aplicada, obtêm-se os dados da Figura 5-5 como resposta a essa tensão.

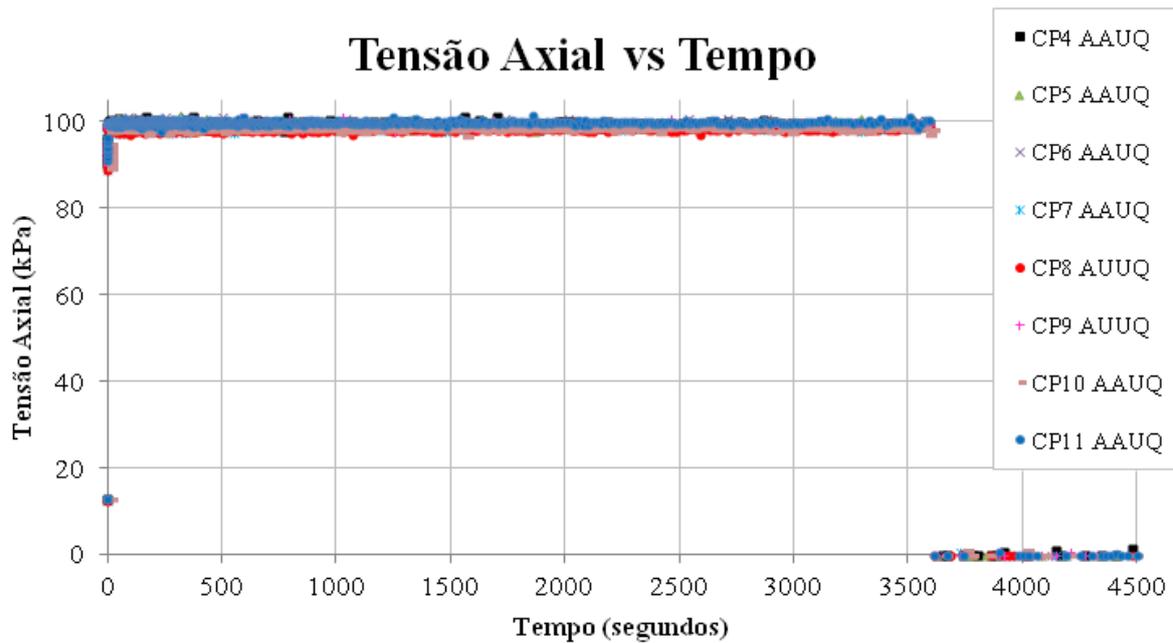


Figura 5-3 – Tensão axial versus Tempo

A Figura 5-4 é uma aproximação durante a tensão aplicada na fase de carregamento, para que seja possível visualizar a variação das tensões durante o ensaio. Foi destacado a tensão aplicada ao CP8 para mostrar o tamanho da variação, indo de 97 a 100 kPa.

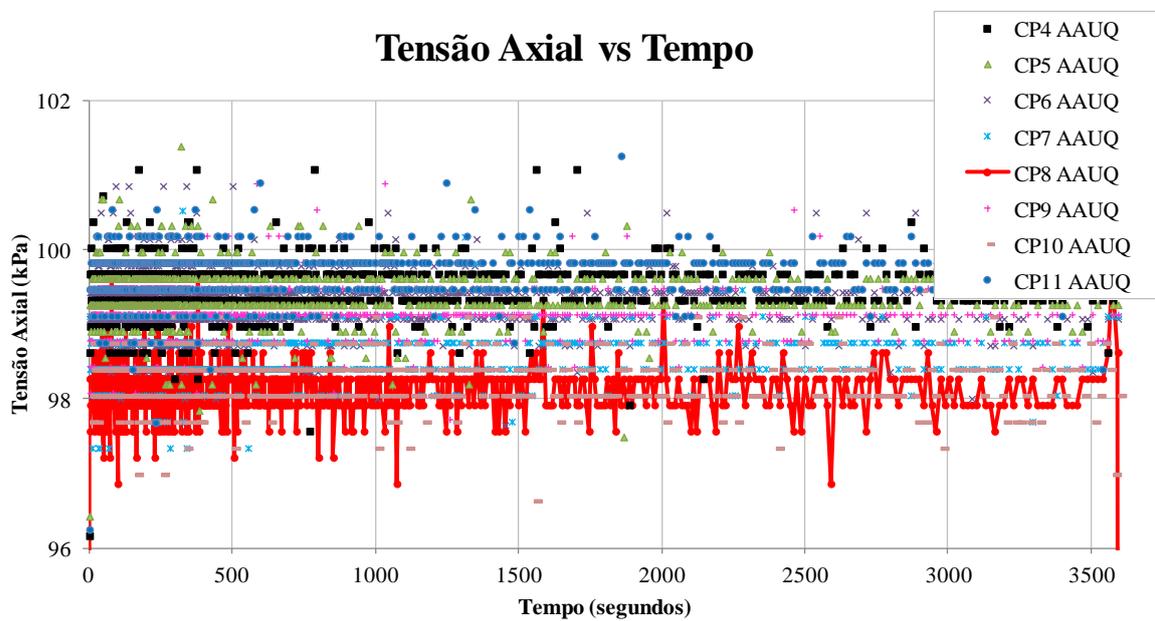


Figura 5-4 – Variação da Tensão Aplicada Durante o Ensaio

O gráfico da Figura 5-5 mostra a resposta dos CPs à tensão constante aplicada pela máquina. Esses resultados são a média das leituras dos dois *LVDT's* instalados durante o ensaio.

É possível ver que, por exemplo, o CP8 tem um resultado muito diferente do CP6 e CP7, apesar de que eles foram confeccionados no mesmo dia, com o mesmo ligante, com o mesmo agregado e com a mesma dosagem. Isso acontece também com o CP4 e CP5; além dos CP9, CP10 e CP11. Uma possível explicação seria as diferentes temperaturas de ensaio de cada corpo de prova; mas os CP9, CP10 e CP11 tiveram seus ensaios em temperatura semelhantes, conforme o gráfico da Figura 5-9. Além disso, as temperaturas de mistura e compactação foram anotadas para posterior análise, e estão na Tabela 5.15.

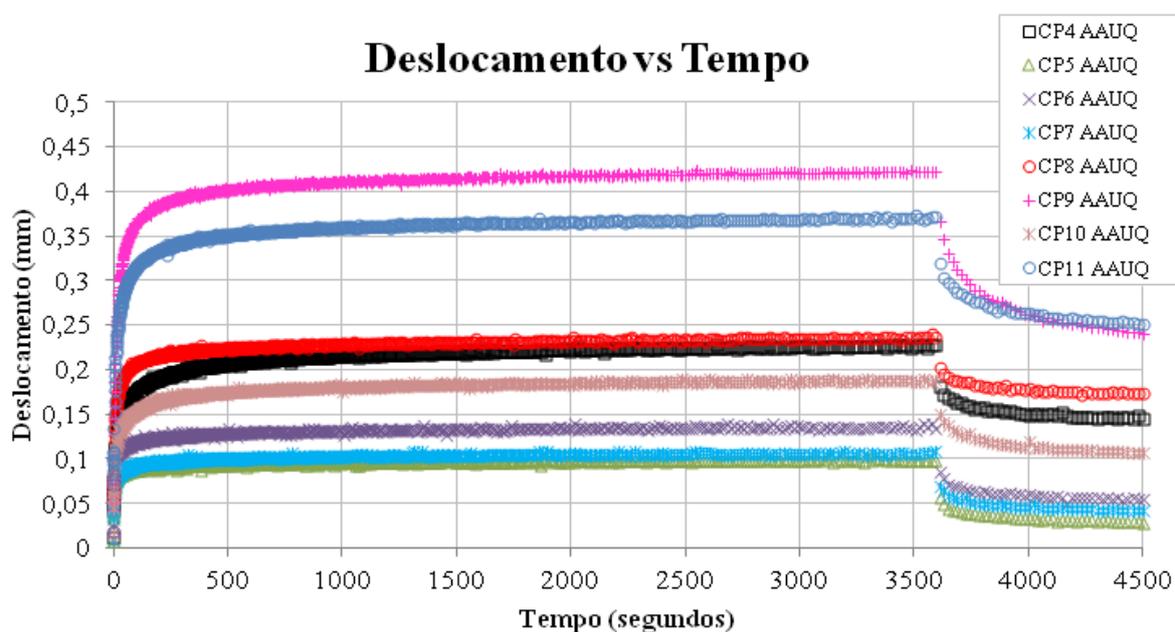


Figura 5-5 – Deslocamento *versus* Tempo

Tabela 5-15 – Temperaturas do Agregado, do Ligante, da Mistura e da Compactação

	CP9	CP10	CP11	CP12	CP13
<b>T Agregado (°C)</b>	162	163	163	156	162
<b>T Ligante (°C)</b>	151	151	150	150	151
<b>T Mistura (°C)</b>	145	150	145	142	150
<b>T Compactação (°C)</b>	135	140	135	122	140

Da mesma forma que foi visto na Figura 5-5, é possível reparar que há uma dispersão muito grande entre os CP's, chegando a variar três vezes (CP7 vs CP9). A Figura 5-6 que traz a deformação em função do tempo. Como a deformação é calculada a partir dos dados de deslocamentos e dos dados de altura de cada corpo de prova, os resultados são semelhantes aos apresentados na Figura 5-5.

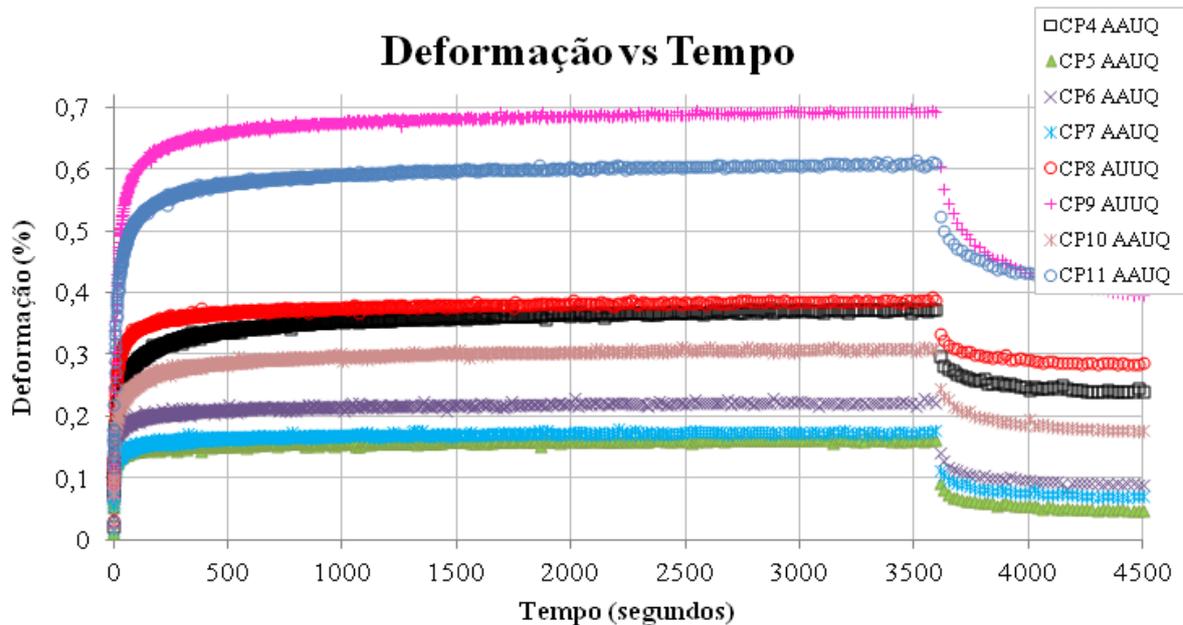


Figura 5-6 – Deformação em função do Tempo.

Na Figura 5-7 é possível ver as curvas de fluência em função do tempo, com o eixo das abscissas na escala logarítmica. Percebe-se a diferença de comportamento entre os vários corpos de prova realizados nesse trabalho. Pode-se notar que o comportamento entre os CPs são muito diferentes. Por exemplo, o CP9 tem uma curva com uma variação de inclinação que o CP11, apesar de terem sido produzidos no mesmo dia. O CP10, como já visto nas figuras anteriores, tem um comportamento bem diferente, com um valor inicial menor que os CP9 e CP11, porém com um valor final parecido com esses dois.

## Creep Compliance vs Tempo

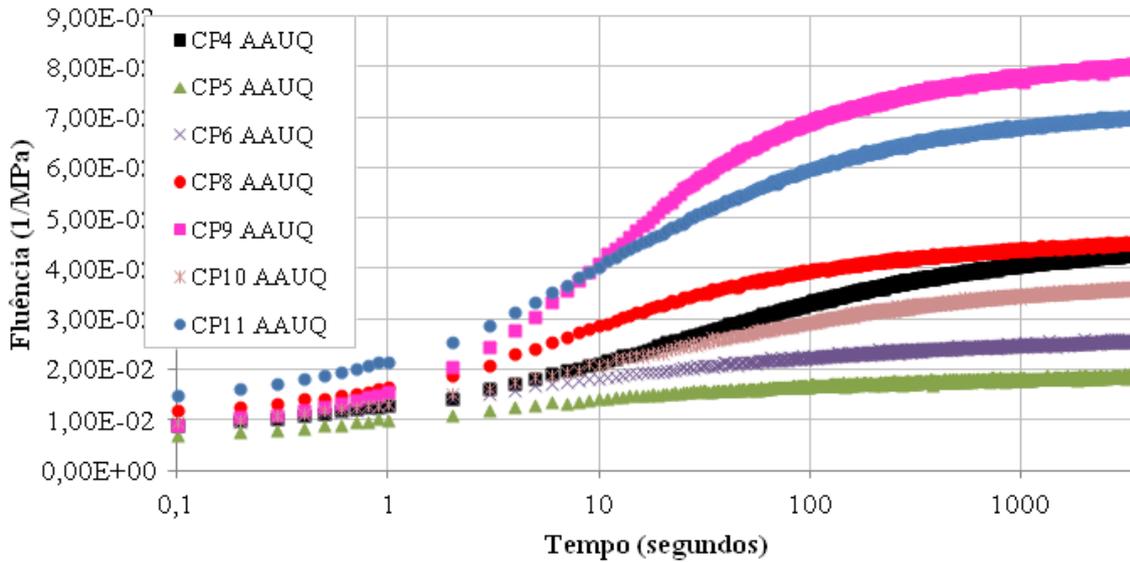


Figura 5-7 – Creep Compliance em função do Tempo

Para fazer o cálculo do Módulo de Relaxação, o programa da máquina na qual foi realizado o ensaio realiza a transformação quasi-elástica, quando simplesmente é realizada a inversão do *Creep Compliance*. O resultado está na Figura 5-8.

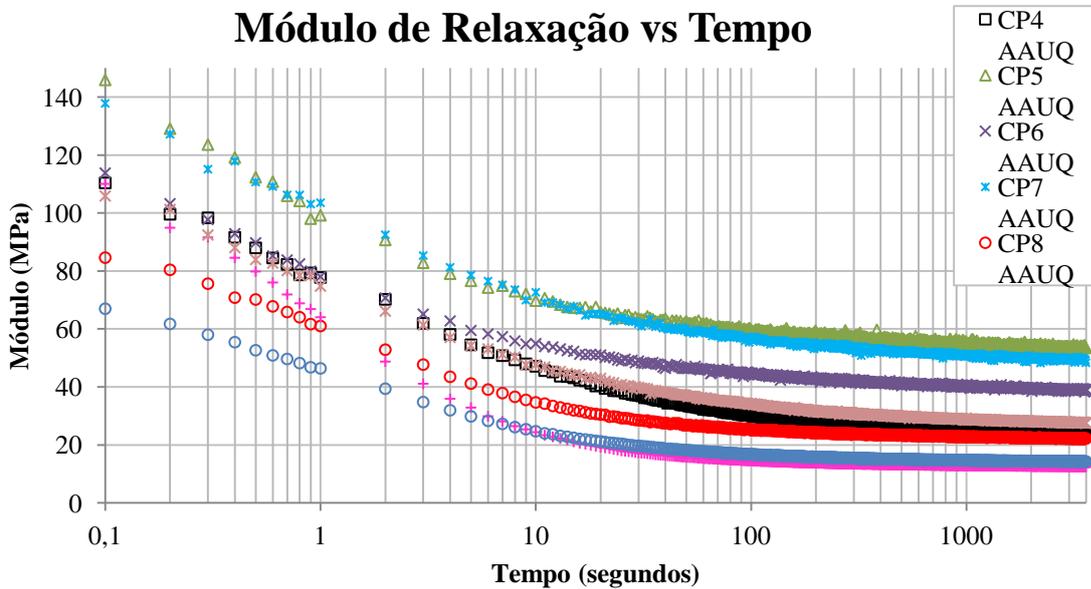


Figura 5-8 – Módulo de Relaxação em função do Tempo

A temperatura durante os cinco primeiros ensaios variou muito, tendo em vista que a sala em que se encontra o aparelho foi utilizada para a realização do ensaio de estabilidade Marshall, onde é necessária a utilização de um banho Maria a 60°C. Além disso, a abertura da porta não era controlada, assim como a quantidade de pessoas. Essa variação de temperatura pode ser observada na Figura 5-9 que traz o valor da temperatura no núcleo de um corpo de prova em função do tempo de ensaio.

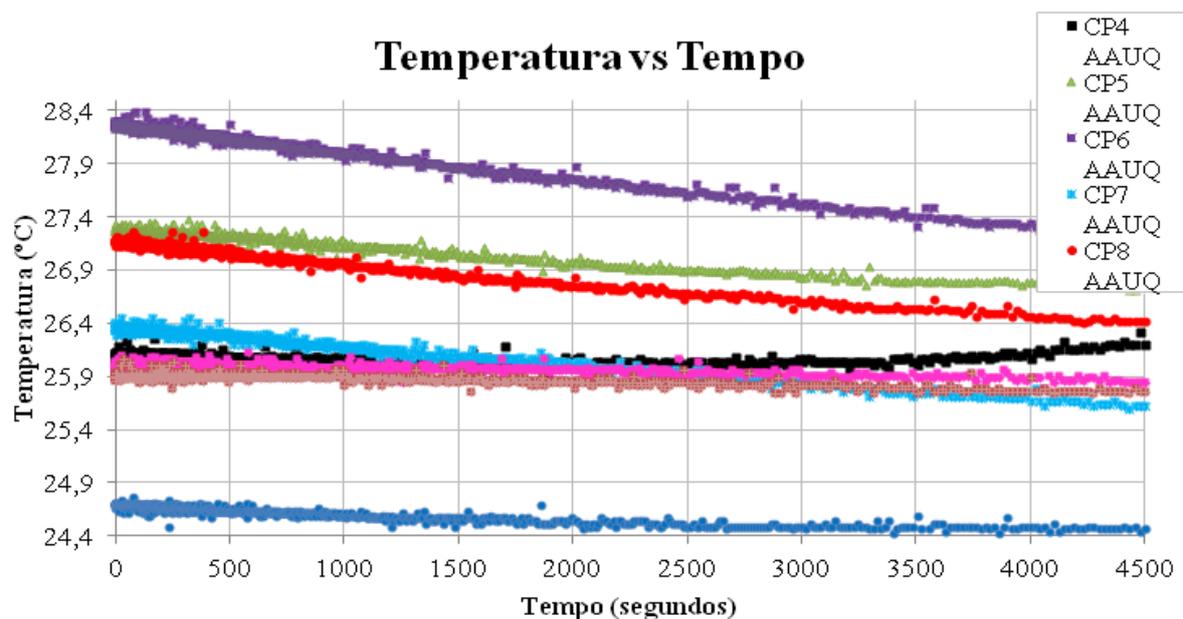


Figura 5-9 – Temperatura no núcleo do corpo de prova vs tempo

Contudo, os ensaios do CP9, CP10 e CP11 foram realizados a uma temperatura controlada, como pode ser verificado na Figura -5-10, com somente o operador da prensa presente algumas vezes para acompanhar o andamento do ensaio, com a porta sempre fechada e o ar-condicionado programado para uma temperatura de 25 °C. Mesmo assim, esses corpos de prova tiveram resultados bastante distintos.

Para poder facilitar uma possível comparação, foi montado outro gráfico (Figura 5-10), só que retirando os resultados dos CP4 e CP5 por terem um teor de asfalto diferente de 8,5%. Foi realizada a média das temperaturas, e o resultado colocado na legenda para poder ter mais um dado para a comparação. Vale a pena, também, reproduzir a Tabela 5-15 para poder ter mais um dado de comparação.

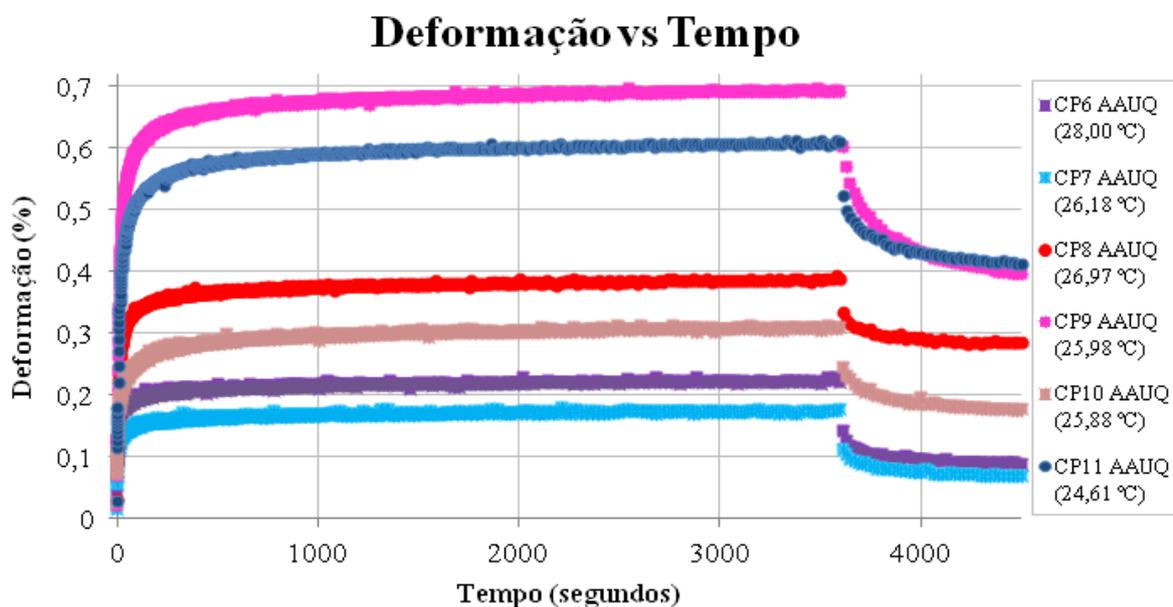


Figura 5-10 – Deformação em função do Tempo com os CP's com o mesmo Teor de Ligante

Tabela 5-16 – Índices de Dosagem

	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10	CP11
<b>da</b>	2,214	2,224	2,215	2,201	2,203	2,203
<b>%Vv</b>	7,73	7,32	7,68	8,25	8,20	8,17
<b>VCB</b>	18,72	18,81	18,73	18,62	18,63	18,64
<b>VAM</b>	26,45	26,12	26,42	26,87	26,83	26,80
<b>RBV</b>	70,78	72,00	70,92	69,28	69,44	69,52

*da é a densidade aparente; %Vv é a porcentagem do Volume de vazios; VCB é a porcentagem do Volume de Vazios com Betume; VAM é o Volume de Vazios do Agregado Mineral; RBV é a relação Betume/Vazios*

Baseando-se nos dados da Figura 5-10 e nos dados da Tabela 5-16, é possível montar a Tabela 5-17 classificando os resultados da seguinte maneira:

- I. Com a deformação, indo da maior deformação até a menor deformação;
- II. Com a densidade, indo da menor densidade para maior densidade;
- III. Do volume de vazios, indo do maior volume para o menor volume.

Tabela 5-17 – Classificação dos CP's quanto a deformação, densidade e volume de vazios

<b>Deformação</b>	<b>Densidade</b>	<b>Volume de Vazios</b>
CP9	CP9	CP9
CP11	CP10	CP10
CP8	CP11	CP11
CP10	CP6	CP6
CP6	CP8	CP8
CP7	CP7	CP7

A partir da Figura 5-10 não é possível retirar alguma relação entre a temperatura de ensaio e a deformação no ensaio de *creep* estático. E ao olhar a Tabela 5-15 é possível observar que o CP9 e o CP7 sempre aparecem nos dois extremos. No entanto, não foi possível retirar nenhuma conclusão sobre a diferença entre os resultados, levando em conta que: todos os copos de prova comparado nesse item possuem o mesmo teor de ligante; atendem a mesma faixa granulométrica; usaram o mesmo lote de material calcário como agregado; usaram o mesmo lote de ligante; foram misturados e compactados nas mesmas máquinas; o ensaio de *creep* estático foi realizado na mesma máquina e pelo mesmo operador. Mesmo havendo o problema de a temperatura ter variado no ensaio com o CP6, CP7 e CP8; a temperatura durante o ensaio do CP9, CP10 e CP11 foi constante e com uma diferença entre eles de 1,37 °C; mesmo assim apresentando diferenças no *creep*.

Como o CP6, CP7 e CP8 foram confeccionados de uma vez e em um dia diferente do CP9, CP10 e CP11, os quais também foram confeccionados de uma vez, há a possibilidade de não ser possível a comparação entre esses dois grupos devido a dispersão estatística inerente ao processo.

Como uma última tentativa, foi construído o gráfico da Figura 5-11 para poder tirar alguma conclusão comparando o CP9, CP10 e CP11 que tiveram suas temperaturas controladas e anotadas durante a mistura, compactação e ensaio de fluência. Mesmo assim, não foi possível retirar uma conclusão sobre o que aconteceu para que houvesse uma diferença tão grande na deformação dos corpos de prova durante o ensaio.

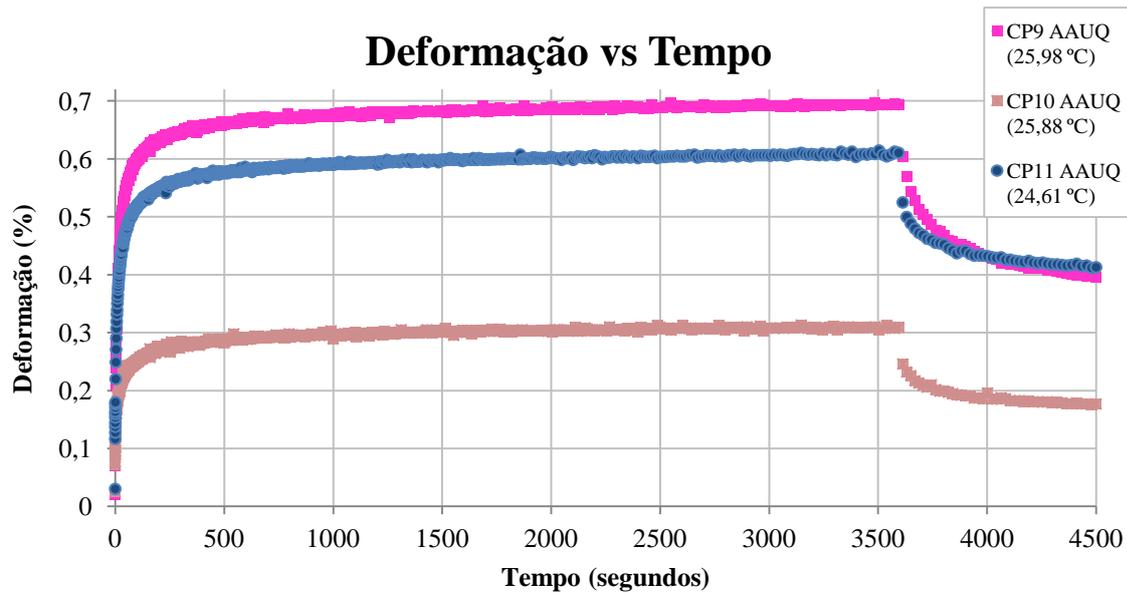


Figura 5-11 – Deformação em função do tempo para a última rodada de CPs

#### 5.4.1. RESULTADO DO ENSAIO COM AS MICROESFERAS

Os dois corpos de prova confeccionados com microesferas também foram sujeitos ao ensaio de *creep* estático. Porém, o resultado do ensaio não era esperado, por isso eles não foram incluídos no item anterior. Além disso, para o segundo corpo de prova com microesferas foi necessário a mudança da tensão aplicada de 100 kPa para apenas 20 kPa no CP13, para que a amostra não fosse perdida assim como aconteceu no CP12; este corpo de prova teve uma deformação tão grande durante o ensaio que ele rompeu e os *LVDT's* não conseguiram registrar o deslocamento todo. A Figura 5-12 mostra fotos do CP12 antes e após o fim do ensaio de *creep* estático.



Figura 5-12 – Corpos de Prova antes do ensaio (superior esquerda) e CP12 após o ensaio de fluência

Na figura 5-13 é possível perceber que a leitura de deslocamento para de acontecer entre o tempo de 2500 e 3000 segundos para o CP12. E é possível observar que mesmo o CP13 tendo 1/5 da carga de ensaio, o deslocamento dele não estava estabilizado e se o ensaio não parasse aos 3600 segundos, provavelmente esse deslocamento continuaria aumentando. Com esses dados não foi possível realizar a análise numérica por nenhum dos dois métodos utilizados nesse trabalho.

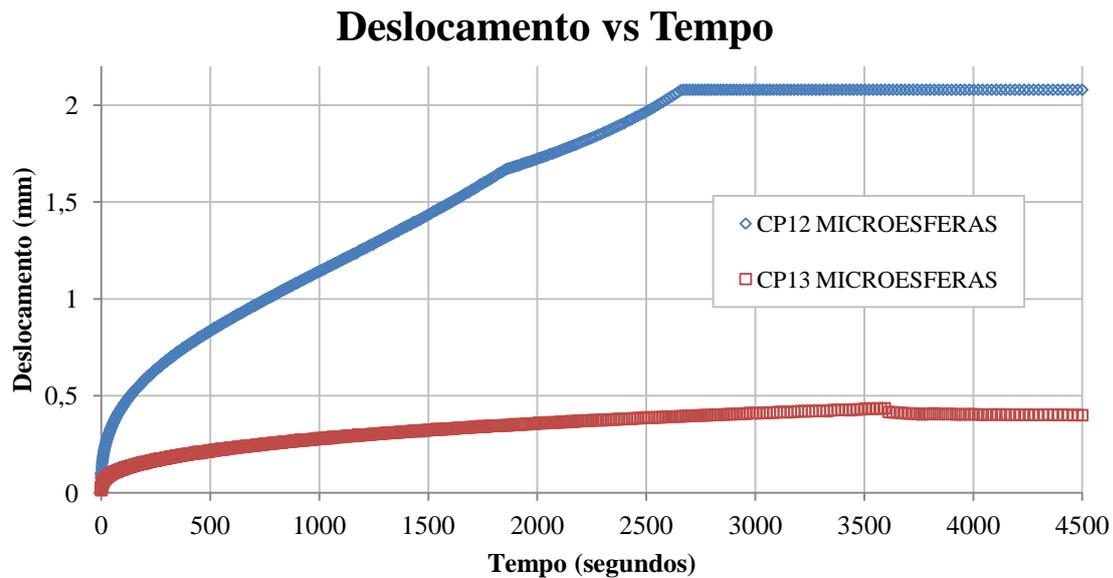


Figura 5-13 – Deslocamento para os Corpos de Prova com Microesferas de Vidro

## 5.5. RESULTADOS NUMÉRICOS ATRAVÉS DE ENTRADA DIRETA NO ABAQUS

Para poder representar o comportamento do corpo de prova durante o ensaio de *creep* estático, o ensaio foi ensaiado dentro do programa. Para isso, foram seguidos os seguintes passos:

- I. Modelagem com as dimensões reais do Corpo de Prova;
- II. Criação de uma placa rígida para distribuir as tensões na superfície do Corpo de Prova, da mesma maneira que é feita no ensaio;
- III. Atribuir às definições de materiais do CP;
  - a. Aqui é possível escolher entre entrar com o Módulo Instantâneo ( $E_0$ ), ou com o Módulo em Longo Prazo ( $E_L$ );
  - b. Foi adotado como padrão o Coeficiente de Poisson como 0,4;
- IV. Escolher o melhor tipo de elemento e o número de elementos;
- V. Criação das condições de contorno e do carregamento aplicado;
- VI. Criação de três steps:
  - a. *Step 1*: A força é gerada e aplicada;
  - b. *Step 2*: O carregamento proveniente da etapa anterior é propagado para essa etapa com duração de 3594 segundos;
  - c. *Step 3*: O carregamento é desativado e a recuperação é avaliada.

O aspecto mais importante é que o modelo constitutivo no ABAQUS não consegue fornecer as deformações plásticas. Ou seja, na parte em que o ensaio para de aplicar uma tensão e só mede a recuperação do corpo de prova, o ABAQUS não consegue representar completamente o comportamento da mistura. Inclusive, o caminho que o programa faz durante a recuperação é o mesmo caminho que ele faz durante o carregamento, um caminho viscoelástico. Uma possível solução seria a adição de uma UMAT (*User Material*) para implementar um modelo constitutivo viscoelastoplástico. Porém, a pesquisa foca somente na parte viscoelástica, e por isso utilizou-se os deslocamentos verticais para poder comparar os resultados do ABAQUS com os resultados experimentais. Um exemplo da simulação de um corpo de prova pode ser visto na Figura 5-14.

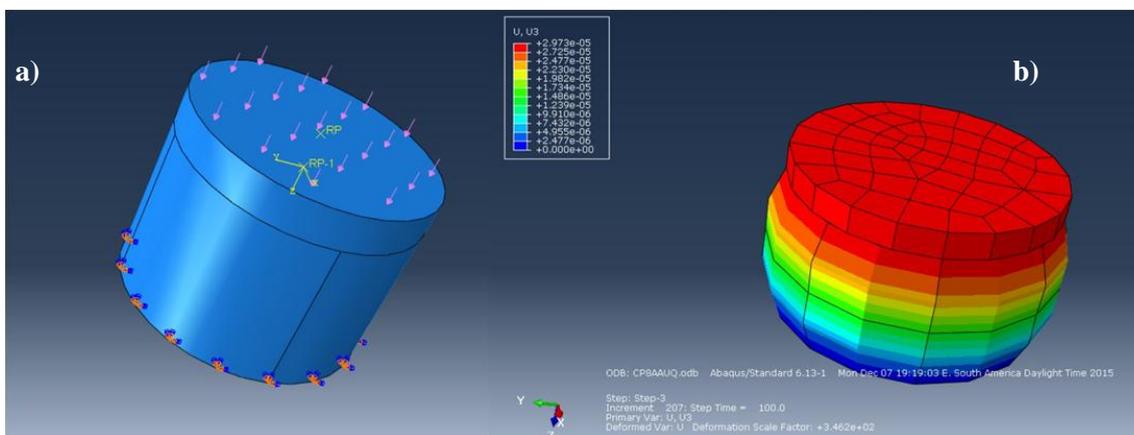


Figura 5-14 – Exemplo do Corpo de Prova: a) pronto para realizar a simulação; b) depois da simulação realizada

Como o ABAQUS não consegue reproduzir o comportamento viscoelastoplástico, para os dados durante o step 3 são iguais aos dados iniciais do carregamento durante o step 2, como pode ser visto na Figura 5-13 abaixo. A figura mostra, para o CP4, que o deslocamento durante o carregamento do começo do ensaio até 200 segundos é igual ao deslocamento quando a tensão é zerada e o deslocamento começa a diminuir.

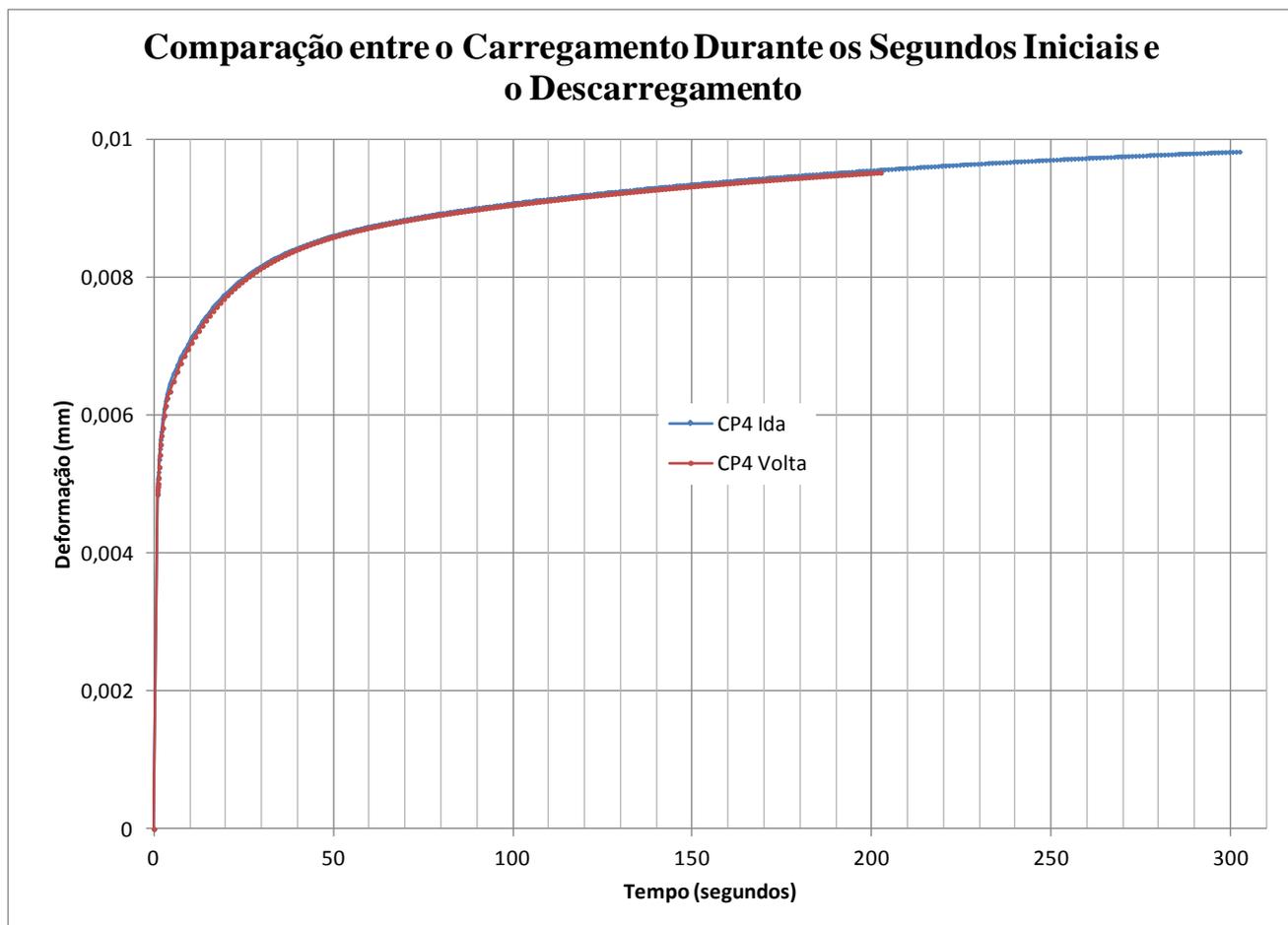


Figura 5-15 – Comparação entre os Deslocamentos nos instantes Iniciais do Ensaio com o Deslocamento ao Final do Ensaio com os Dados do ABAQUS

Várias tentativas de realizar o correto procedimento no ABAQUS foram realizadas. A primeira tentativa foi com o elemento C3D6, um prisma linear triangular, só que com resultados insatisfatórios. Logo, o elemento C3D8R foi estudado também, mas com resultados abaixo do esperado. Para que esses elementos tivessem resultados próximos do ensaio, o número total de elementos tinha que ser muito grande, fazendo com que o tempo de processamento fosse maior. Por fim, utilizou-se o elemento C3D20R, que foi o utilizado em todos os CPs analisados, com o número de 24 elementos. Em cada um dos corpos de prova foi realizada uma comparação diferente,. Por exemplo, o CP4 foi utilizado vários tipos de elementos para que seja possível saber qual elemento se ajusta melhor ao resultado experimental. No CP6, foi realizada uma comparação entre qual módulo se ajusta melhor ao resultado experimental. Já no CP8, foi analisado se ao realizar uma regressão dos módulos para descobrir o módulo instantâneo no tempo igual à zero, já que para realizar as análises foi utilizado como módulo Elástico instantâneo o primeiro valor do ensaio ( $t=0,1$ ).

Na Figura 5-16 é possível visualizar as diferentes situações simuladas para o CP4. A primeira informação é se o resultado é experimental (representado por marcadores abertos) ou numérico (representado somente por linhas). A segunda informação é o tipo de elemento utilizado, conforme já explicado. Entre parênteses está o número de elementos. Logo depois é possível saber se foi utilizado o Módulo de Elasticidade Instantâneo (EI) ou o Módulo de Elasticidade em Longo prazo (EL), ou o módulo de Elasticidade em Longo Prazo fornecido pelo ensaio ( $E_{\text{ensaio}}$ ). Quando adotado o EI, o  $G$  (*shear Modulus*) necessariamente precisa ser o  $G$  instantâneo, e quando utilizado ou o EL ou o  $E_{\text{ensaio}}$  o  $G$  utilizado é o  $G_{\infty}$  (em longo prazo). Portanto, é possível ver que o padrão para entrada de dados é: Elemento tipo C3D20R, 24 ou 96 elementos, módulo de elasticidade em longo prazo e  $G_{\infty}$ .

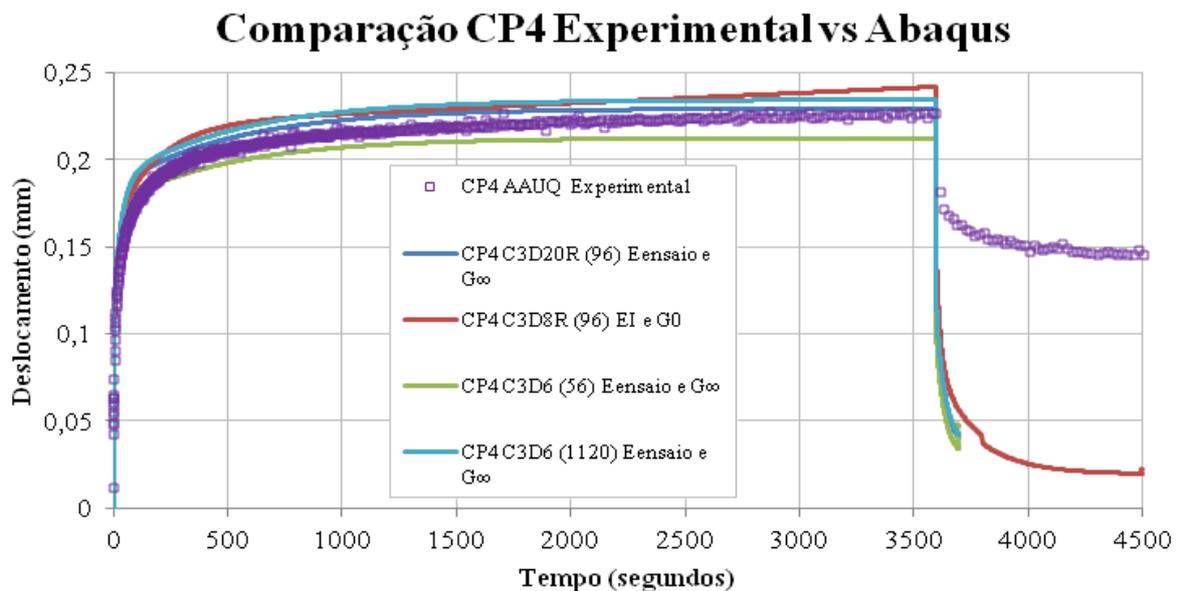


Figura 5-16 – Comparação entre o resultado experimental e os resultados fornecidos pelo ABAQUS para o CP4

Com as propriedades já definidas, a partir de agora o elemento utilizado será sempre o C3D20R, só variando o número de elementos globais. Além disso, será variado o Módulo de Elasticidade para poder fazer uma comparação para uma futura conclusão a ser retirada.

Na Figura 5-17 é possível notar que o melhor ajuste é quando se utiliza 96 elementos e o Módulo de Elasticidade adotado como o módulo fornecido pelo ensaio. Quando se utiliza o  $E_0$  pode-se perceber que ele tem um deslocamento final de quase 0,12 mm, enquanto que o

resultado do ensaio é de aproximadamente de 0,13 mm. Enquanto isso, quando se utiliza o quarto resultado do ensaio de módulo de relaxação (E4) como Módulo de Young no ABAQUS, o deslocamento foi maior que o medido experimentalmente. Nessa situação, os melhores ajustes são para quando se retira o E do ensaio e quando se utiliza o terceiro resultado do módulo de relaxação como Módulo de Young no programa. Além disso, é possível observar que a diferença com 24 ou 96 elementos é mínima, não dando para diferenciar os dois resultados nesse gráfico.

### Comparação CP6 Experimental vs Abaqus

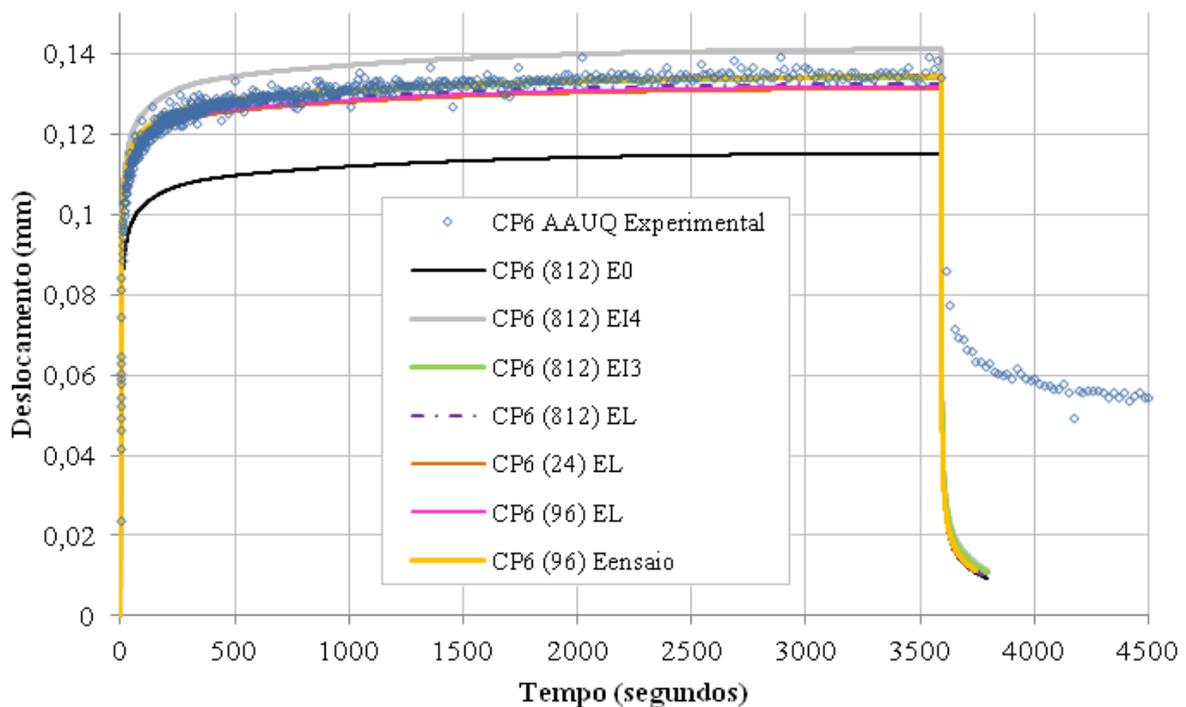


Figura 5-17 – Comparação entre o resultado experimental e os resultados fornecidos pelo ABAQUS para o CP6

A Figura 5-18 traz os ajustes realizados para o oitavo corpo de prova. A partir dela é possível tirar algumas conclusões: Quando utilizado, o módulo elástico instantâneo tem uma tendência de não se estabilizar e sim de continuar a subir se o ensaio não for interrompido. Enquanto isso, quando se utiliza o módulo em longo prazo, essa tendência desaparece. Além disso, a regressão para encontrar o módulo no tempo zero ( $t=0$ ) aproxima ainda mais a análise numérica com os resultados experimentais, como pode ser visto entre as linhas rosa (CP8 (24) Sem Regressão do G0) e pela linha azul claro (CP8 (24) e Regressão do G0); entretanto a

maior diferença ocorre quando os módulos são variados para se obter o melhor ajuste. Vale ressaltar que a regressão não alterou o resultado quando a análise é feita para módulo em longo prazo, como é o caso das linhas cinza e preta: (CP8(24)  $E_{\text{ensaio}}$  e Regressão do G0) e (CP8 (24)  $E_{\text{ensaio}}$ ), respectivamente.

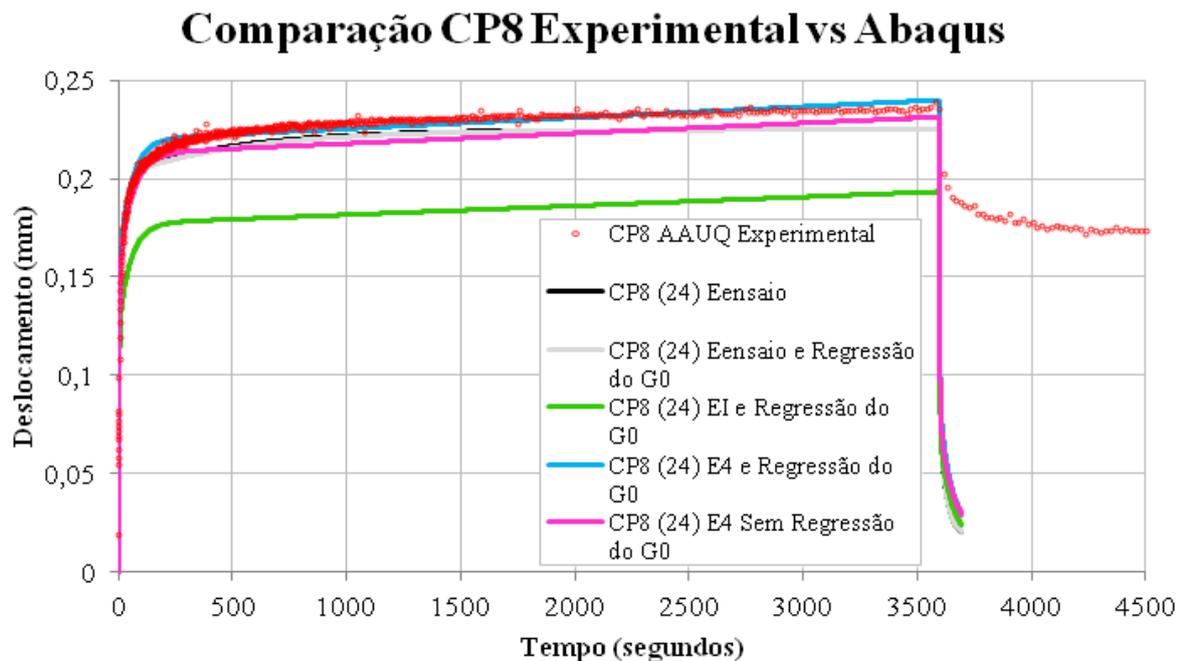


Figura 5-18 – Comparação entre o resultado experimental e os resultados fornecidos pelo ABAQUS para o CP8

No caso do CP8 em particular, o melhor ajuste é encontrado quando: o Módulo é considerado o quarto valor ( $t=0,4$ ), logo a análise é realizada para o Módulo instantâneo. Como o Módulo de Elasticidade adotado que chegou mais perto do resultado numérico foi o Módulo de Relaxação para  $t=4$ , na simulação da Figura 5-19 começou-se com o módulo no terceiro tempo. Ele é representado pela linha preta, é possível ver que a diferença foi pouca, mas não ficou bom o suficiente. Decidiu-se então rodar com o Módulo em Longo Prazo. Foram feitas duas rodadas, uma com 812 elementos e outra com 96 elementos. A diferença entre essas duas rodadas é mínima, os dois resultados se ajustam bem aos dados experimentais.

## Comparação CP10 Experimental vs Abaqus

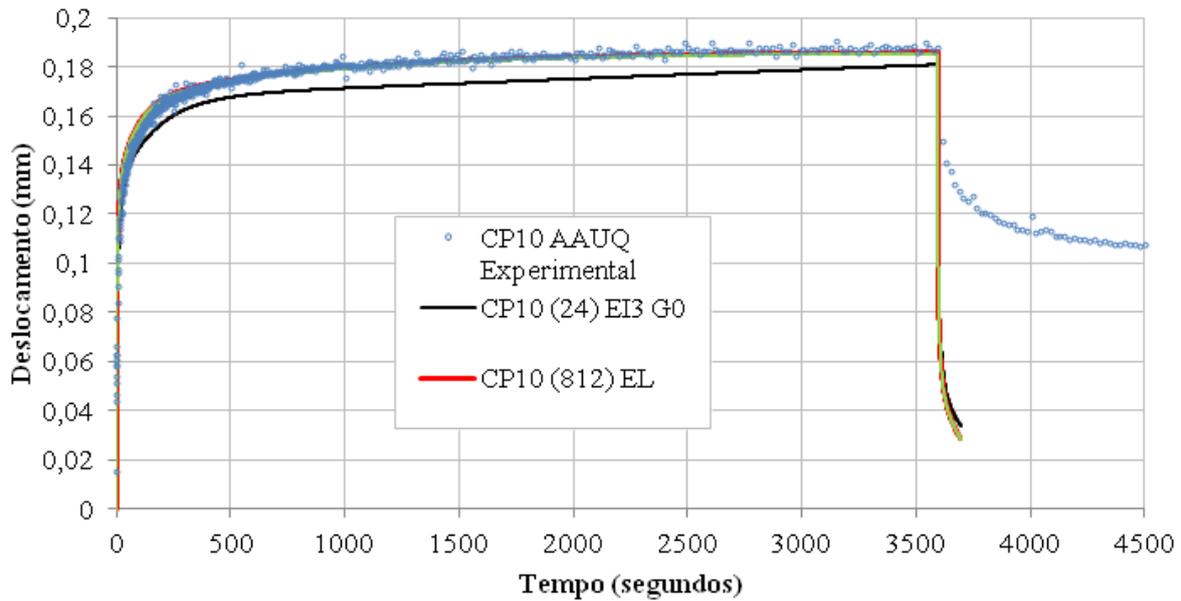


Figura 5-19 – Comparação entre o resultado experimental e os resultados fornecidos pelo ABAQUS para o CP10

Levando-se em conta que nas outras simulações a combinação que funcionou mais vezes foi com o Módulo em Longo prazo e 24 elementos, para o último corpo de prova (CP11) foi realizada apenas uma rodada com essas características, e o resultado pode ser visto na Figura 5-20.

## Comparação CP11 Experimental vs Abaqus

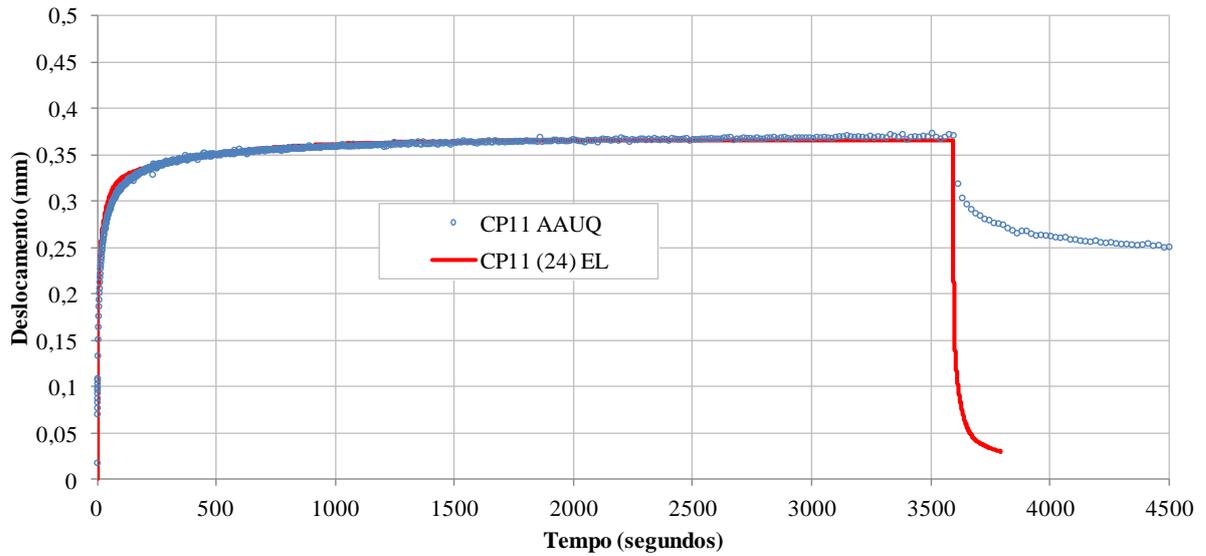


Figura 5-20 - Comparação entre o resultado experimental e os resultados fornecidos pelo ABAQUS para o CP4

Cabe ressaltar que não foi possível realizar a simulação com essa metodologia para os corpos de prova: CP5, CP7 e CP9. Após realizar diversas tentativas, o programa ABAQUS sempre apontava o mesmo erro: sem convergência para os dados de materiais. Após comparar esses CPs em particular com outros, foi possível notar um ruído excessivo nos dados obtidos no ensaio de *creep* estático para esses corpos de prova. Tentando solucionar esse problema, foi aplicada uma regressão simples logarítmica nos dados já normalizados para poder realizar a entrada no ABAQUS. Assim, foi possível realizar a simulação no CP5, e os resultados estão na Figura 5-21

## Comparação CP5 Experimental vs Abaqus

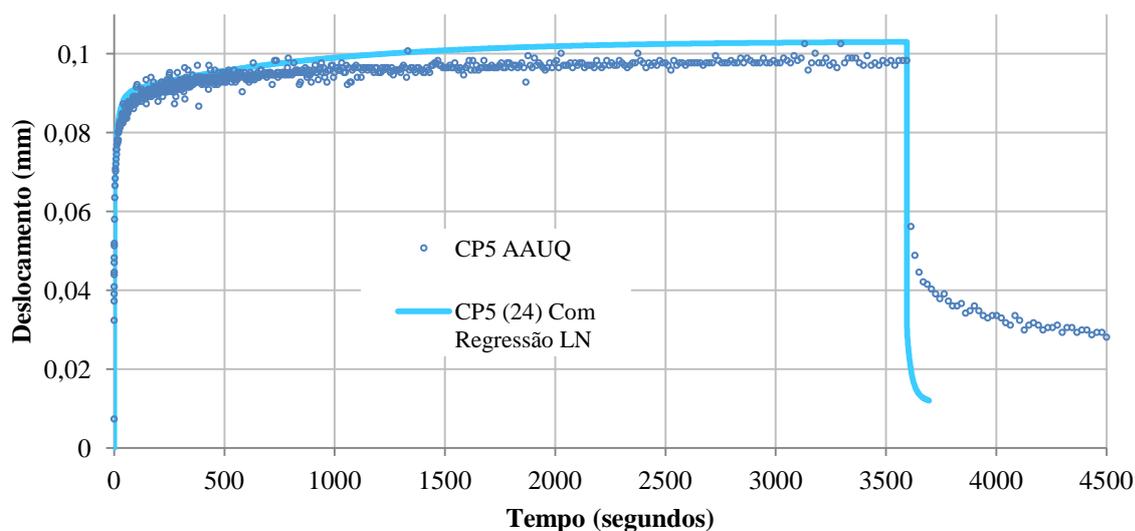


Figura 5-21 – Comparação entre o resultado do ABAQUS e os dados Experimentais, para o CP5

Pode ser que o resultado da simulação não se ajusta tão bem ao resultado experimental porque a regressão realizada é grosseira. Contudo, isso indica que quando há um problema de convergência é porque o ruído nos resultados experimentais é muito grande. Dá para perceber isso olhando com cuidado a Figura 5-21 e percebendo o tanto de marcador que está fora da curva experimental. Talvez, realizando a suavização necessária para a série de Prony o resultado final se aproxime melhor do resultado experimental.

### 5.6.RESULTADOS NUMÉRICOS ATRAVÉS DAS SÉRIES DE PRONY

Nessa parte do trabalho é realizada a avaliação dos resultados obtidos com a série de Prony. Para isso, foi necessário obter os termos da série de Prony, fazer a interconversão de *creep compliance* para módulo de relaxação, e da mesma forma que na metodologia anterior é necessário fazer uma normalização e transformar de módulo normal para cisalhante através das expressões 5.1 e 5.2, nessa etapa o processo é realizado novamente porque no ABAQUS o formato de entrada desses dados é em função do módulo de cisalhamento em função do tempo.

$$G(t) = \frac{E(t)}{2(1+\nu)} \quad (5.1)$$

$$K(t) = \frac{E(t)}{3(1-2\nu)} \quad (5.2)$$

onde  $G(t)$  é o módulo de cisalhamento em função do tempo;

$K(t)$  é módulo volumétrico em função do tempo;

$\nu$  é o coeficiente de Poisson.

Com os elementos da série de Prony devidamente adequadas ao formato do ABAQUS, é só fazer a simulação e retirar os valores dos deslocamentos para poder comparar com os valores numéricos. Resolveu-se comparar o resultado de um corpo de prova com o resultado obtido na seção passada e também mostrar o resultado de um corpo de prova que não foi possível realizar a simulação na etapa anterior. Vale ressaltar que para todos os resultados experimentais não foi necessária a pré-suavização dos dados. Os dados da série de Prony para os outros corpos de prova estão no apêndice 1 anexo a esse trabalho.

### **5.6.1. CP6 AAUQ**

A seguir serão apresentados os coeficientes da série de Prony para a fluência e para o módulo de relaxação. Foram realizados dois ajustes, um com 4 elementos e outro com 5 elementos. A Tabela 5-18 traz os resultados encontrados pelo método de ajuste MQL para o sexto corpo de prova.

Tabela 5-18 – Série de Prony para o *Creep Compliance* e para o Módulo de Relaxação

<i>Creep Compliance</i>			Módulo de Relaxação		
i	$\tau_i$	$D_i$	i	$\rho_i$	$E_i$
Ajuste 1			Ajuste 1		
1	4.00E-01	2.24E-03	1	4.00E-01	3.37E+01
2	4.00E+00	7.18E-03	2	4.00E+00	3.05E+01
3	4.00E+01	3.89E-03	3	4.00E+01	8.47E+00
4	4.00E+02	3.20E-03	4	4.00E+02	6.44E+00
Ajuste 2			Ajuste 2		
1	4.00E-01	2.33E-03	1	4.00E-01	3.40E+01
2	4.00E+00	6.85E-03	2	4.00E+00	2.98E+01
3	4.00E+01	4.40E-03	3	4.00E+01	9.53E+00
4	4.00E+02	2.37E-03	4	4.00E+02	5.19E+00
5	4.00E+03	1.56E-03	5	4.00E+03	6.92E-01

A Figura 5-22 traz os resultados de *creep compliance* e módulo de relaxação obtido através do ensaio de *creep* estático para o corpo de prova número 6.

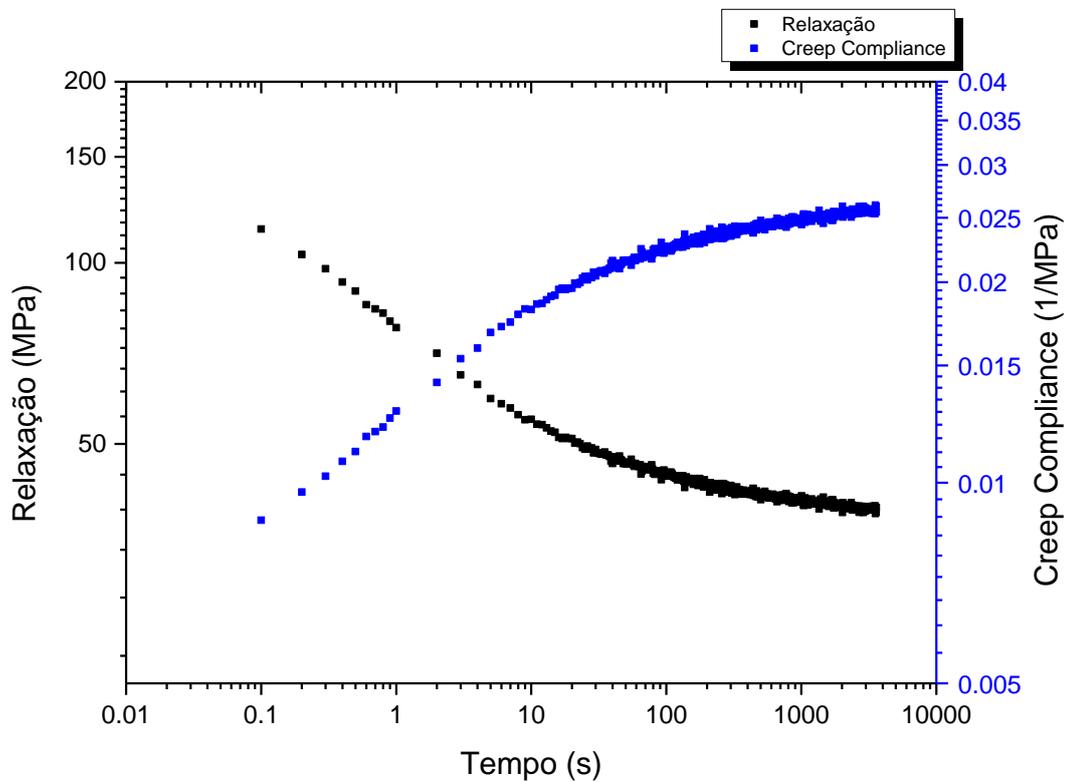


Figura 5-22 – Resultado experimental do módulo de Relaxação e do *Creep Compliance*

A Figura 5-23 mostra o ajuste pela série de Prony para a função fluência. Não existem diferenças significativas entre a os dados experimentais e os dois ajustes realizados. O segundo Ajuste se distancia um pouco do resultado experimental próximo ao tempo de 0,1 segundos. Essa diferença é causada pela condição da máquina não conseguir aplicar a tensão instantaneamente.

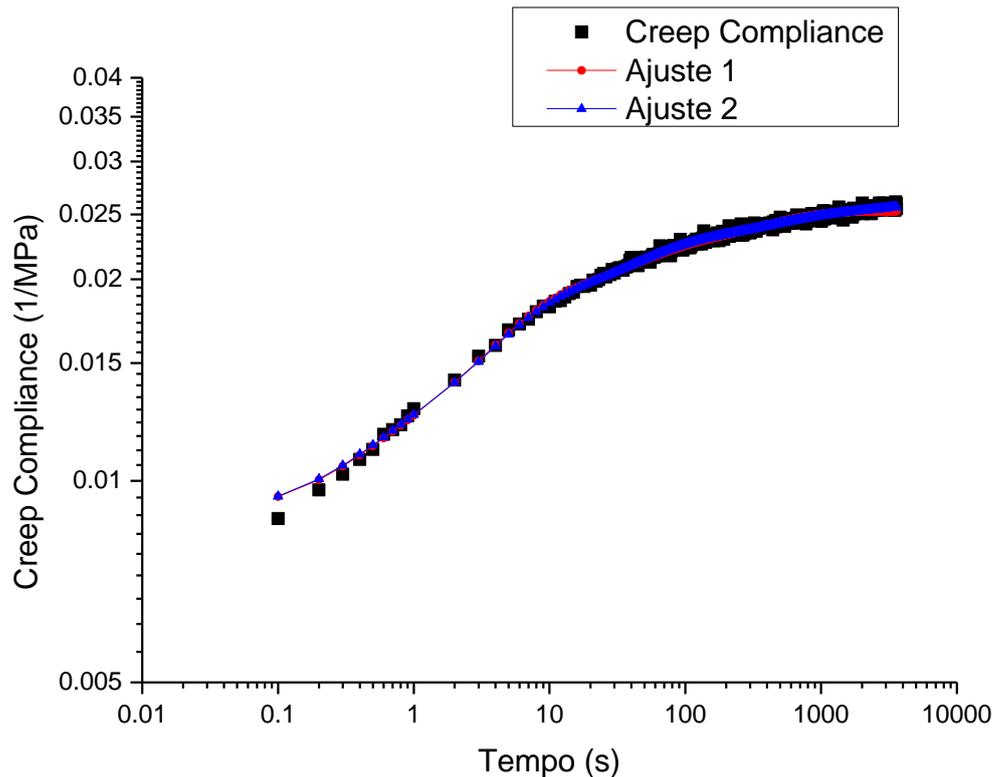


Figura 5-23 – Comparação entre o resultado experimental e os dois ajustes da Série de Prony para o *Creep Compliance*

Na Figura 5-24 pode-se notar que, para o CP6, tanto o ajuste 1 como o ajuste 2 são satisfatórios para o módulo de relaxação, mostrando assim a interconversão quasi-elástica apesar de sua limitação, tem bons resultados para as condições desse corpo de prova.

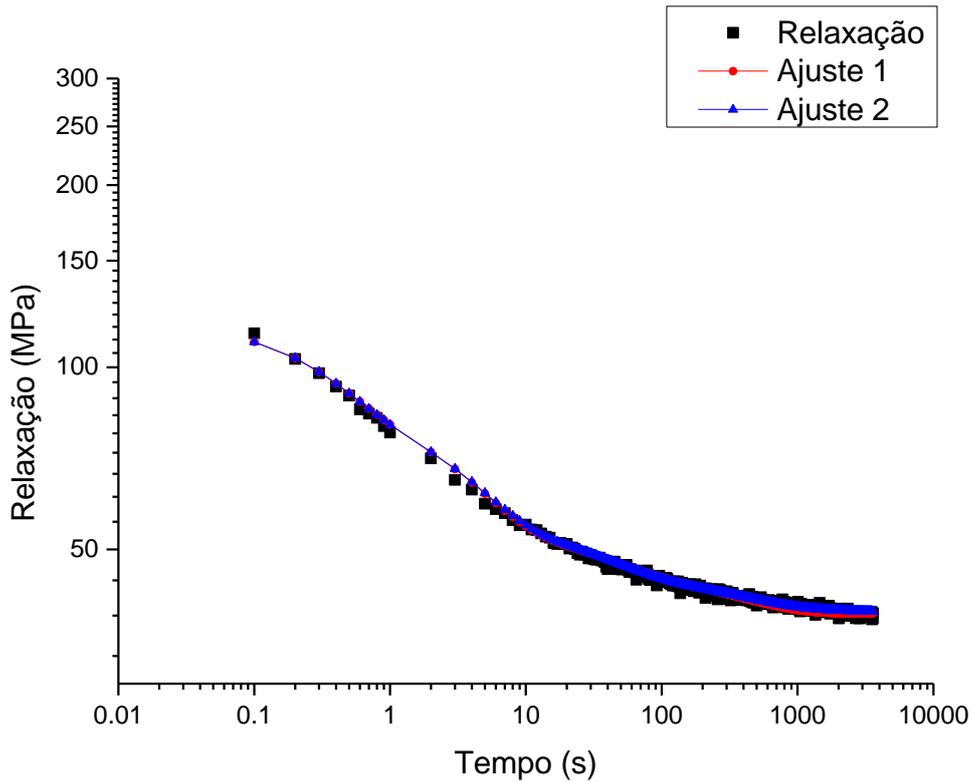


Figura 5-24 - Comparação entre o resultado experimental e os dois ajustes da Série de Prony para o Módulo de Relaxação

Com a Figura 5-25 é possível perceber que os resultados com a série de Prony são muito bons, e por ser um método matemático mais sofisticado e mais robusto não requer um número muito grande de tentativa de aperfeiçoar a entrada no ABAQUS. Após definida no primeiro corpo de prova quais parâmetros de entrada são os melhores, o processo pode ser repetido para todos os outros corpos de prova. Além do mais, não houve problema de convergência em nenhum dos casos aqui estudados.

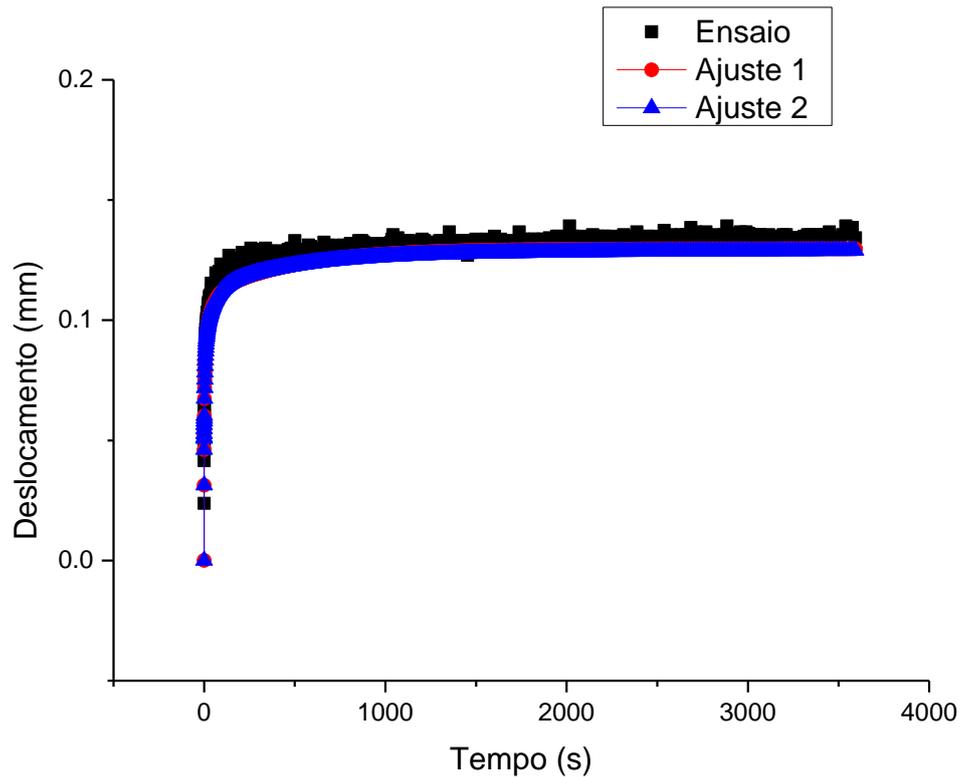


Figura 5-25 – Comparação entre os resultados do ensaio e o resultado dos dois ajustes após a simulação no ABAQUS

Na Figura 5-26 é possível observar que o erro é muito grande nos primeiros instantes, mas logo depois ele se estabiliza em uma faixa de 4 %. Esse erro nos instantes iniciais acontece porque o aparelho não consegue aplicar uma carga de 100 kPa instantaneamente, levando alguns segundos para ela alcançar essa condição. Mas logo a carga se estabiliza, e o erro diminui substancialmente.

## Erro Relativo Para o Deslocamento

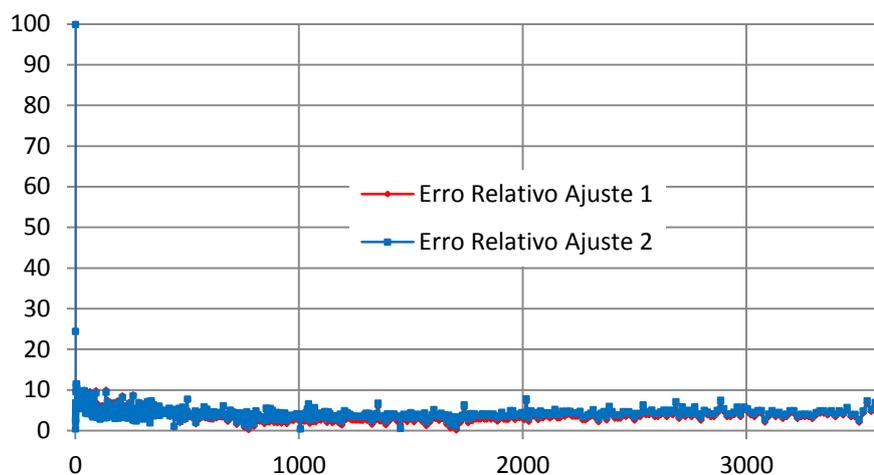


Figura 5-26 – Erro Relativo para os dois ajustes em relação ao deslocamento

Na Figura 5-27 é possível ver a comparação entre a entrada com as séries de Prony no ABAQUS, com os dois ajustes, e a entrada direta realizada no item anterior desse trabalho. Percebe-se que com a entrada direta dos dados no ABAQUS o ajuste é mais fino. Também é possível perceber que para o sexto corpo de prova os dois ajustes da série de Prony são muito próximos e trazem um bom resultado.

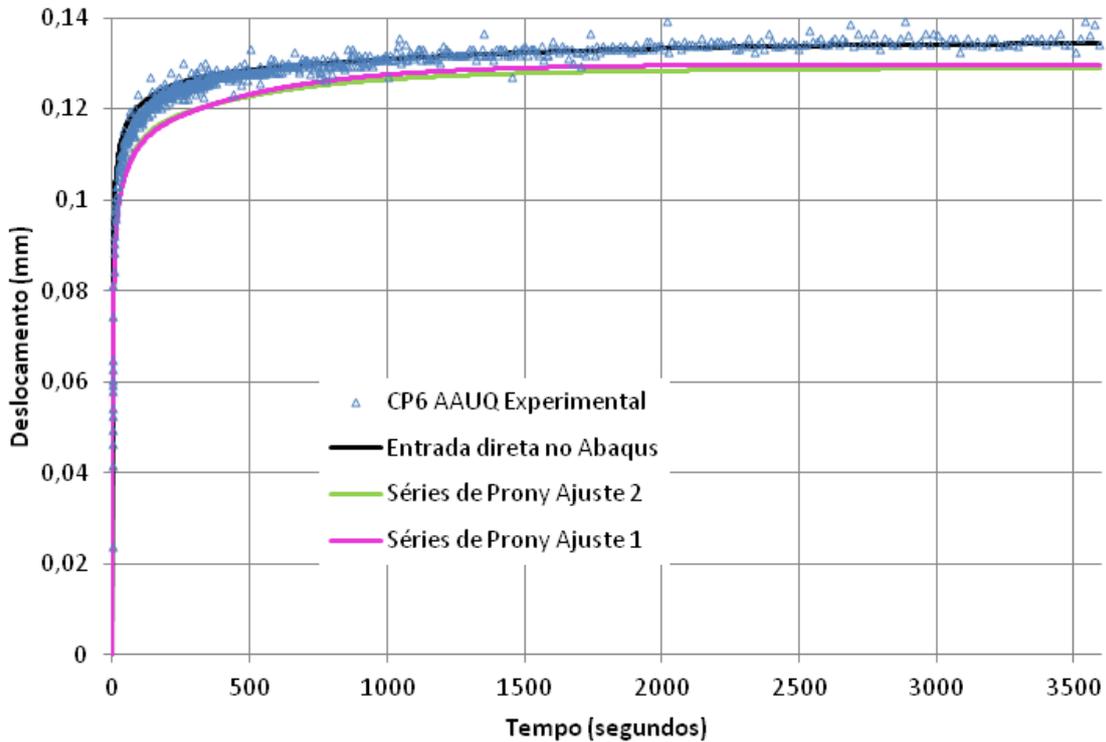


Figura 5-27 – Comparação entre as duas metodologias de entrada de dados no ABAQUS

Porém, não há necessidade de realizar várias rodadas do programa para procurar a melhor entrada, quando se utiliza a série de Prony. É possível ter que realizar esse ajuste na etapa matemática, quando está se estimando os parâmetros da série, mas não demora tanto quanto a simulação do programa de elementos finitos.

### 5.6.2. CP5 AAUQ

A seguir são mostrados os resultados para o corpo de prova número 5 (CP5). Como explicado anteriormente, por se tratar de um método matemático, não houve o problema de convergência apresentado anteriormente para o mesmo CP. A Tabela 5-20 traz os coeficientes da série de Prony tanto para a fluência como para o Módulo de Relaxação, encontrados para esse corpo de prova para dois ajustes: com quatro e cinco elementos.

Tabela 5-19 – Série de Prony para o *Creep Compliance* e para o Módulo de Relaxação

<i>Creep Compliance</i>			Módulo de Relaxação		
<b>i</b>	<b><math>\tau_i</math></b>	<b><math>D_i</math></b>	<b>i</b>	<b><math>\rho_i</math></b>	<b><math>E_i</math></b>
	Ajuste 1			Ajuste 1	
<b>1</b>	4.00E-01	1.96E-03	1	4.00E-01	4.48E+01
<b>2</b>	4.00E+00	5.42E-03	2	4.00E+00	3.71E+01
<b>3</b>	4.00E+01	2.29E-03	3	4.00E+01	7.87E+00
<b>4</b>	4.00E+02	1.90E-03	4	4.00E+02	7.90E+00
	Ajuste 2			Ajuste 2	
<b>1</b>	4.00E-01	2.03E-03	1	4.00E-01	2.82E+01
<b>2</b>	4.00E+00	5.20E-03	2	4.00E+00	3.80E+01
<b>3</b>	4.00E+01	2.62E-03	3	4.00E+01	1.77E+01
<b>4</b>	4.00E+02	1.36E-03	4	4.00E+02	6.10E+00
<b>5</b>	4.00E+03	1.00E-03	5	4.00E+03	8.99E-01

A Figura 5-28 traz os resultados de *creep compliance* e módulo de relaxação obtido através do ensaio de *creep* estático para o corpo de prova número 5. O resultado é utilizado para verificar se os termos da série de Prony foram calculados corretamente. A escala do eixo das abscissas é logarítmica, mostrando que o ensaio está dentro de cinco décadas logarítmicas. Essa informação é utilizada para saber quantos termos utilizar na série de Prony.

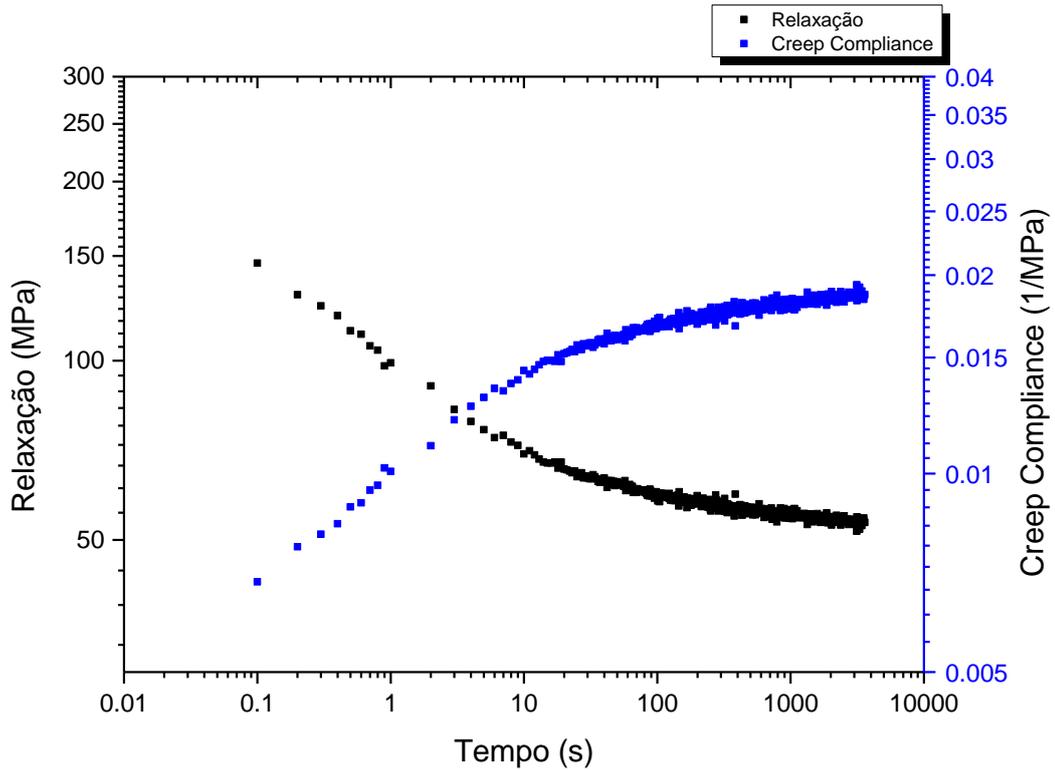


Figura 5828 – Comparação entre o resultado experimental do módulo de Relaxação e do *Creep Compliance*

A Figura 5-29 mostra o ajuste pela série de Prony para a função fluência. Não existem diferenças significativas entre a os dados experimentais e os dois ajustes realizados, a não ser próximo ao tempo de 0,1 segundos onde os dois ajustes se distanciam um pouco do resultado experimental. Essa diferença é causada pela condição da máquina não conseguir aplicar a tensão instantaneamente.

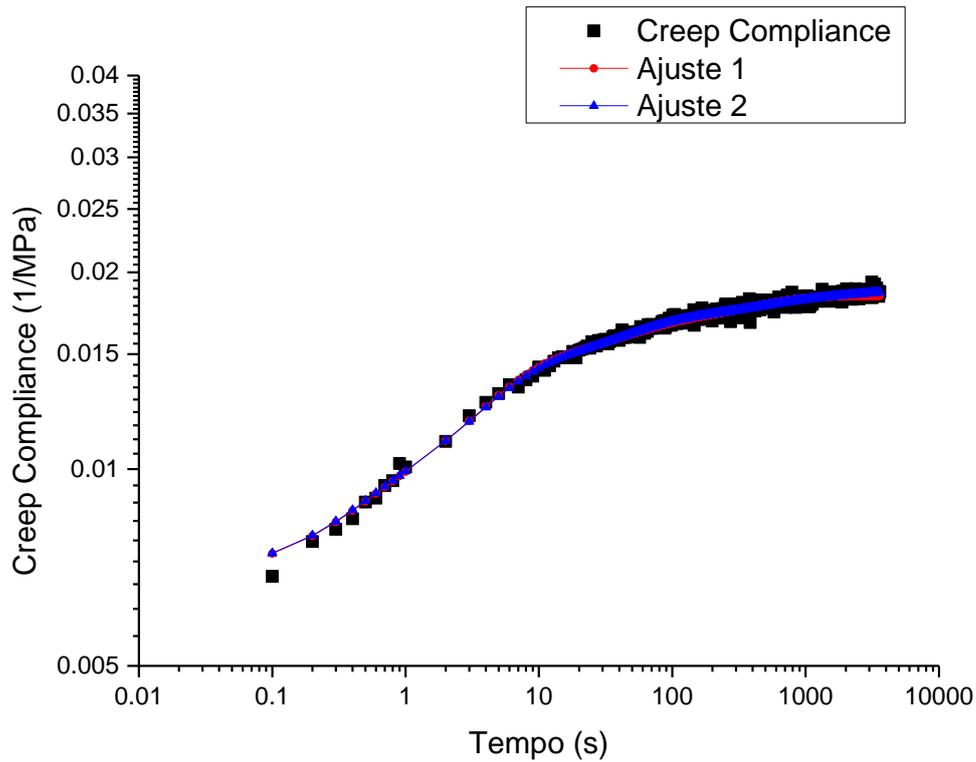


Figura 5-29 – Comparação entre o resultado experimental e os dois ajustes da Série de Prony para o Creep Compliance

Nesse caso, como mostra a Figura 5-29, houve uma pequena diferença entre o ajuste 1, o ajuste 2 e o resultado experimental para o Módulo de Relaxação. Os dois ajustes se distanciam dos resultados experimentais entre os tempos de 0,3 e 100 segundos, com o segundo ajuste se distanciando mais que o primeiro. Essa diferença pode ter ocorrido por causa do ruído dos resultados experimentais. Assim, a interconversão quasi-elástica pode não conseguir realizar a correta transformação entre os dados de fluência e relaxação.

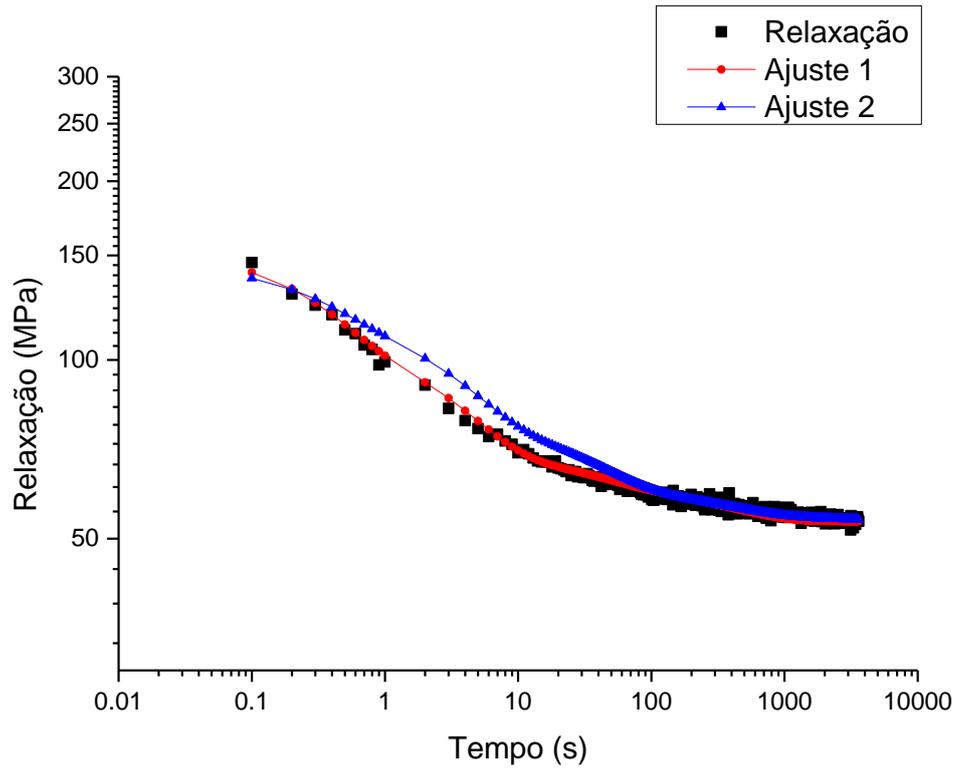


Figura 5-30 - Comparação entre o resultado experimental e os dois ajustes da Série de Prony para o Módulo de Relaxação

Mesmo com as diferenças encontradas na Figura 5-29, na Figura 5-31, que mostra os deslocamentos obtidos após o processamento pelo ABAQUS, o Ajuste 2 foi o que teve melhor resultado em comparação aos dados de deslocamentos experimentais.

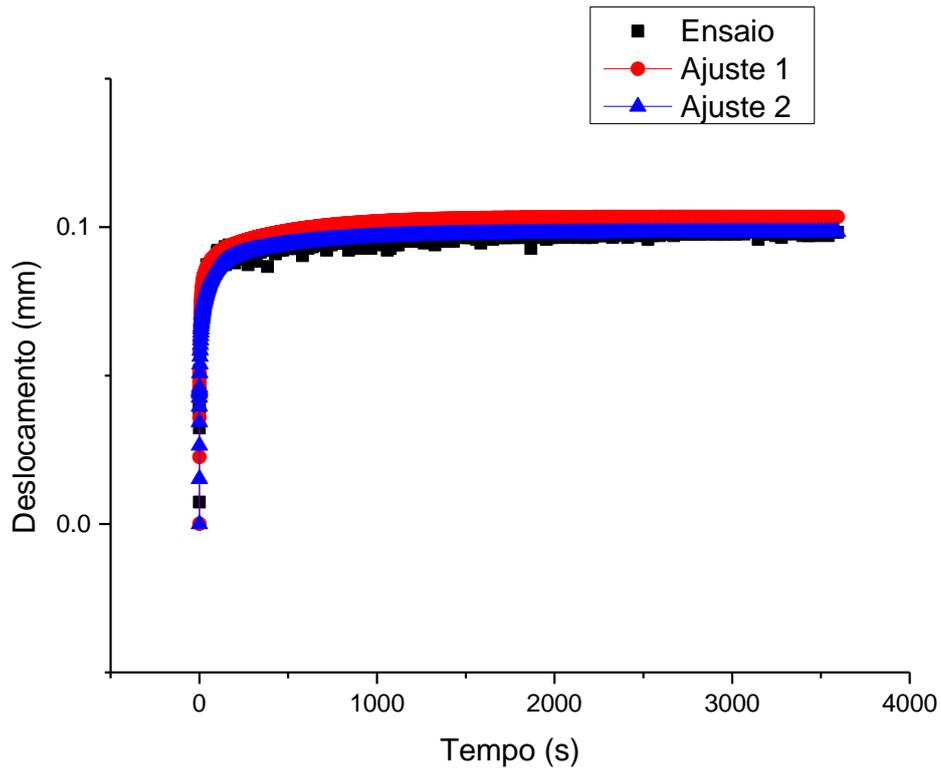


Figura 5-31 - Comparação entre o resultado experimental e os dois ajustes da Série de Prony para o deslocamento

Os dois ajustes se aproximam de forma satisfatória do resultado experimental desse corpo de prova, demonstrando mais uma vez que o método da série de Prony é mais confiável que o método de entrada direta dos dados, apesar dos melhores resultados encontrado pelo primeiro método. O erro relativo para esse CP foi menor do que o encontrado no CP passado, e pode ser visualizado na figura 5-32.

## Erro Relativo Para o Deslocamento

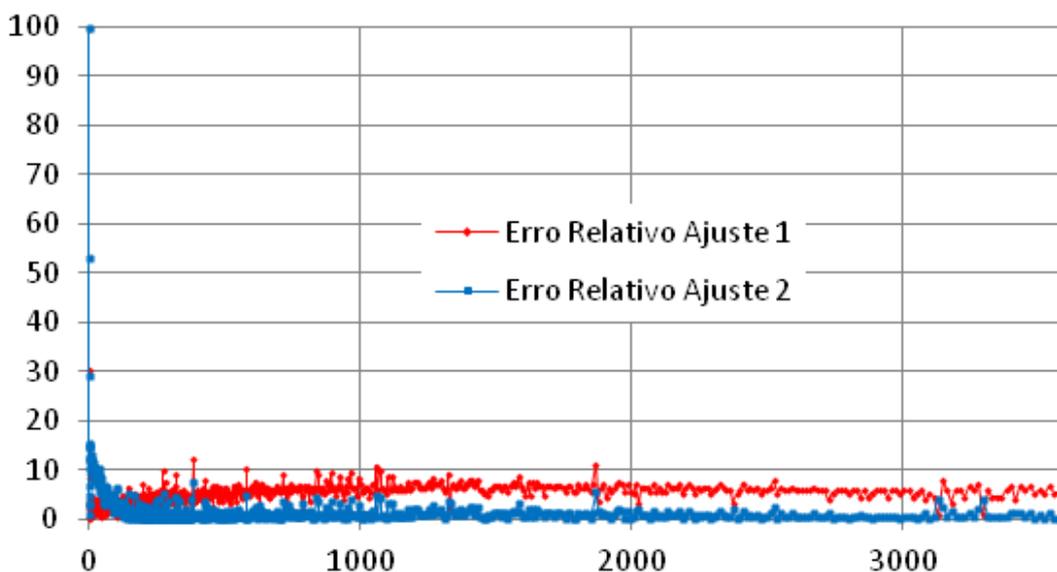


Figura 5-32 – Erro Relativo para os dois ajustes no CP5 em relação ao deslocamento

O erro relativo foi menor para o ajuste 2, e de fato é ele que se aproxima melhor do resultado experimental, diferentemente do que aconteceu no CP6, onde o ajuste 1 se aproximou melhor dos resultados experimentais. Logo é possível ver que mesmo utilizando a série de Prony para entrar com os dados no ABAQUS, um pequeno ajuste terá que ser feito para poder encontrar o melhor ajuste para os resultados experimentais.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são descritas as principais conclusões obtidas durante a campanha experimental e numérica da mistura asfáltica tipo AAUQ confeccionada com CAP 50/70 e agregado mineral. Foi realizado ensaio de *creep* estático em 8 corpos de prova, e a análise numérica foi realizada tanto com a entrada de dados diretamente no ABAQUS, como com a utilização da série de Prony, para depois entrar com os dados no ABAQUS.

É possível concluir primeiramente que o ensaio de *creep* estático fornece um resultado com grandes dispersões entre os corpos de prova, e às vezes até durante o ensaio, a ponto de não ser possível modelar alguns corpos de prova com os dados sendo colocados diretamente no ABAQUS. Não tinha sido realizado, até então, neste laboratório vários ensaios com o mesmo material para fazer uma comparação entre os resultados da fluência. Talvez a máquina já não consiga manter a tensão sempre constante, ou os *LVDT's* começaram a perder precisão de sua leitura. É possível, também, que como se trata de um material sem o agregado graúdo o contato entre as partículas determine como esse corpo de prova irá se comportar durante o ensaio, e esse contato é muito pequeno, sendo refeito todos os instantes. Tanto é que ao tentar realizar o ensaio nos corpos de prova de microesferas de vidro, o corpo de prova se deformou até romper, antes de o ensaio acabar. Um melhor controle das temperaturas durante a confecção dos corpos de prova e além de um melhor controle durante a compactação pode diminuir essa dispersão.

Não foi possível relacionar a temperatura durante o ensaio com a dispersão de dados. Mesmo quando a temperatura foi controlada da melhor maneira possível, a dispersão foi grande quando se leva em conta os resultados dos CPs que foram confeccionados no mesmo dia. Os índices utilizados na dosagem podem relacionar melhor essas diferenças, porém é preciso realizar uma pesquisa mais detalhada sobre a influência do volume de vazios e da relação Betume/Vazios sobre o resultado do *creep* estático. No entanto, mesmo com essa dispersão, o objetivo da pesquisa foi alcançado: obtenção de parâmetros do modelo viscoelástico existente no programa ABAQUS para realizar uma simulação de um corpo de prova como problema de contorno e a comparação dos resultados numéricos com os dados experimentais.

O método de interconversão quasi-elástico para obtenção da função de relaxação foi utilizado com sucesso para o material estudado. Pode-se dizer que é possível utilizar esse método para outras misturas, mas outra pesquisa com a realização de vários corpos de prova

de vários tipos de misturas é necessária para obter essa conclusão. Para o AAUQ com agregado calcário típico da região do Distrito Federal, com o uso de ligante CAP 50/70, com um ensaio de *creep* estático a uma temperatura próxima a 25 °C e um tempo de aplicação de carga curto esse método funcionou e foi utilizado em todas as simulações realizadas nesse trabalho.

Os parâmetros constitutivos para o modelo numérico viscoelástico do ABAQUS exige que os dados de entrada estejam em função do Módulo Cisalhante ou Volumétrico, tanto para o uso das séries de Prony como para a entrada direta de dados de ensaio no programa. Dessa forma, seria ideal utilizar ensaios com o Reômetro, já que ele fornece o módulo de cisalhamento dinâmico e assim entrar com esses dados direto no domínio da frequência, precisando talvez apenas de uma normalização. O modelo viscoelástico presente no ABAQUS não é capaz de descrever o comportamento completo das misturas asfálticas, tendo em vista que não é possível simular as deformações plásticas próprias da natureza da mistura asfáltica, e que geralmente é utilizado o ensaio de *creep* estático para descrever tais deformações. Foi visto que quando o carregamento é aplicado, o retorno se dá pelo mesmo caminho utilizado na ida.

O método de entrada direta com os dados no ABAQUS funciona muito bem quando não há muito ruído nos dados fornecidos pelo ensaio, necessitando apenas de algumas calibrações para poder alcançar o melhor resultado possível. Para isso, a melhor as melhores condições são: elementos tipo C3D20R com uma quantidade de 24 elementos para a densidade da malha. Para a calibração, recomenda-se utilizar ou o módulo de Elasticidade Instantâneo ( $E_0$ ) juntamente com o Módulo de Cisalhamento Instantâneo ( $G_0$ ) ou o Módulo de Elasticidade em longo prazo ( $E_\infty$ ) juntamente com o Módulo de Cisalhamento em Longo Prazo ( $G_\infty$ ). Para melhorar o resultado obtido, é possível realizar uma regressão simples nos Módulos de Relaxação dos cinco primeiros tempos (onde o material tem um comportamento elástico) e refazer a normalização utilizando o Módulo no instante zero encontrado na regressão.

Para o método de entrada com os elementos da série e Prony, o método da colocação por Mínimos Quadrados Linear (MQL) é robusto e quando utilizado com 5 ou 6 elementos para a série de Prony produz resultados muito bons, com um erro com média de 3 %, nas condições desta pesquisa.

## BIBLIOGRAFIA

ANDRADE, M. H.. **Introdução à Pavimentação - Notas de Aula UFPR**. Curitiba: [s.n.], 2012.

ANP. **Agência Nacional de Petróleo, Gás e Energia**, 2005. Disponível em: <[www.anp.gov.br/?dw=6795](http://www.anp.gov.br/?dw=6795)>. Acesso em: 2015.

ARAÚJO, M. D. P.; BANDEIRA, R. A. D. M.; CAMPOS, V. B. G. Custos e fretes praticados no transporte rodoviário de cargas: uma análise comparativa entre autônomos e empresas. **Journal of Transporte Literature**, Rio de Janeiro, 2014.

BABADOPULOS, L. F. D. A. L. Avaliação do Modelo Viscoelástico Linear Aplicado a Misturas Asfálticas Utilizadas em Revestimentos de Pavimentos no Brasil. **Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará como requisito para obtenção do Título de Engenheiro Civil.**, Fortaleza, 2013.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 2008.

BOTARO, V. R. et al. Obtenção e Caracterização de Blendas de Asfalto CAP 20, Modificado com Poliestileno Recilcado, Resíduos de Pneu e Lignina Organossolve. **Revista Escola de Minas**, Ouro Petro, Jan/Mar 2006.

BROWN, S. F. **Thirty-sixth Rankine Lecture: Soil Mechanics in pavement engineering**. [S.l.]: [s.n.], v. 46, 1996. 381 - 426 p.

CONCEPA; LAPAV. **Estudo de Desempenho de Pavimentno Experimental com Objetivo de Validar o Méotodo Racional de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis - Fase 2**. UFRGS. Porto Alegre. 2012.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT. Pesquisa CNT de Rodovias 2015 - Relatório Gerencial. **Pesquisa CNT de Rodovias 2015**, p. 9, 2015.

DASSAULT SYSTÈMES. **ABAQUS 6.13 Online Documentation**. [S.l.]: [s.n.], 2013.

DE MELLO, L. G. R. A Teoria do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas. **Tese de Doutorado em Geotecnia, Univerisdade de Brasília**, Brasília, 2008.

DE SOUSA, P. C.; SOARES, J. B. Método da Colocação para Obtenção de Séries de Prony Usadas na Caracterização Viscoelástica de Materiais Asfálticos. **Anais do XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET**, Rio de Janeiro, 2007.

DNIT. Relatório de Gestão do Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes, Brasília, 2009.

HENNING, W. G.; O'CONNELL, R. J.; SASSELOV, D. D. Tidally Heated Terrestrial Exoplanets: Viscoelastic Response Models. **The Astrophysical Journal**, Cambridge, 28 October 2009.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. Kentucky: Prentice Hall, 1993.

JUNIOR, T. D. C. Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Convencionais e Modificadas. **Dissertação apresentada no Programa de Pós Graduação da UFRGS para obtenção do título de Mestre**, Porto Alegre, 2008.

KIM, Y. R. **Inelastic Behavior of Construction Materials - Notas de Aula**. [S.l.]: [s.n.], 2006.

LOTTI, R. S. et al. Aplicabilidade Científica do Método dos Elementos Finitos. **Revista Dental Press Ortodontia e Ortopedia Facial**, Maringá, 2006.

MARTINEZ, J. G. B. Avaliação de Desempenho de Misturas Betuminosas com Adição de Lodos de ETA e de ETE. **Dissertação de Mestrado em Geotecnia - UnB**, Brasília, Agosto 2014.

MONTEIRO, C. C. D. C. Determinação Computacional do Factor de Intensidade de Tensões em Fendas na Vizinhança de Entalhes. **Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica**, Lisboa, Setembro 2007.

MOTTA, L. M. G.; MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. Segunda. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2005.

PARK, S. W.; KIM, Y. R. Interconversion Between Relaxation Modulus and Creep Compliance for Viscoelastic Solids. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 1999.

PORTELA, E. D. L. Análise Viscoelástica de Materiais Asfálticos Considerando os Efeitos da Temperatura e do Dano. **Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Transportes**, Fortaleza, 2011.

PREGO, A. S. D. S. **A Memória da Pavimentação no Brasil**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2001.

QUIÑONES, F. S. Aplicabilidade de Resíduos Recilcados da Construção e Demolição como Agregados em Misturas Asfálticas. **Tese de Doutorado em Geotecnia - UnB**, 2014.

SERRA, L. TREKEARTH, 2005. Disponível em: <[http://www.trekearth.com/gallery/South\\_America/Brazil/Southeast/Rio\\_de\\_Janeiro/Paraty/photo279292.htm](http://www.trekearth.com/gallery/South_America/Brazil/Southeast/Rio_de_Janeiro/Paraty/photo279292.htm)>. Acesso em: Junho 2015.

SILVA, H. N. Caracterização Viscoelástica Linear de Misturas Asfálticas: Operacionalização Computacional e Análise pelo Método dos Elementos Finitos. **Dissertação Submetida ao Programa de Mestrado pela UFC para a Obtenção do Título de Mestre**, Fortaleza, 2009.

SOARES, J. B.; DE SOUZA, F. V. Verificação do Comportamento Viscoelástico Linear em Misturas Asfálticas. **16º Encontro de Asfalto**, Rio de Janeiro, Dezembro 2002.

THEISEN, K. M. Aplicação do Princípio da Correspondência Elasto-Viscoelástica para Previsões de Deformabilidade de Misturas Asfálticas. **Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da UFRGS para obtenção do título de Mestre**, Porto Alegre, Março 2006.

UFJF. **Universidade Federal de Juiz de Fora**, 2012. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/secom/2012/12/05/seminario-discute-impactos-economicos-da-estrada-uniao-e-industria/>>. Acesso em: Junho 2015.

VINICIUS RIBEIRO E SOUZA, M. EFEITO DE FIBRAS SINTÉTICAS NAS PROPRIEDADES DE LIGANTES E CONCRETOS ASFÁLTICOS. **DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA**, 2010.

WILLIAMS, M. L.; LANDEL, R. F.; FERRY, J. D. The Temperature Dependence of Relaxation Mechanism in Amorphous Polymers and other Glass Forming Liquids. **Journal of American Chemical Society**, v. 77, p. 3701-3707, 1955.

## APÊNDICE 1

Nesse apêndice estão apresentados os dados encontrados nos ajustes das Séries de Prony para os Corpos de Prova que não foram analisados no item: 5.3.3 Resultados Numéricos Através Das Séries De Prony. É apresentado os dois ajustes para a Série de Prony para o Creep Compliance e os dois ajustes para a Série de Prony para o Módulo de Relaxação. Logo depois aparecem quatro figuras:

1. Os dados Vindos do Ensaio de *Creep* para a Fluência e para a Relaxação;
2. Os dois ajustes para o Compliance;
3. Os dois ajustes para o Módulo de Relaxação;
4. O resultado do deslocamento para os dois ajustes após a implementação desses parâmetros no ABAQUS.

### Anexo I

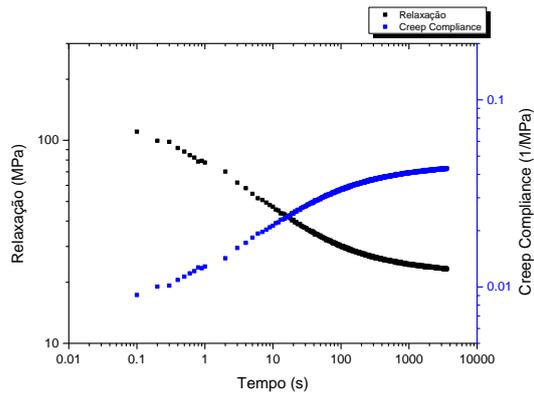
#### AAUQ CP4

Serie de Prony Creep Compliance

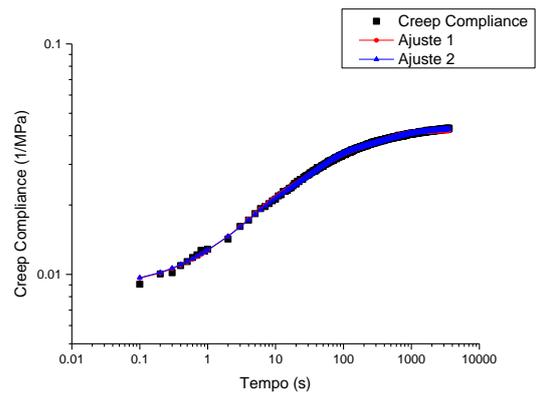
i	$\tau_i$	$D_i$
Ajuste 1		
1	4.00E-01	1.49E-03
2	4.00E+00	8.68E-03
3	4.00E+01	1.30E-02
4	4.00E+02	9.77E-03
Ajuste 2		
1	4.00E-01	1.69E-03
2	4.00E+00	8.02E-03
3	4.00E+01	1.40E-02
4	4.00E+02	8.11E-03
5	4.00E+03	3.13E-03

Serie de Prony Relaxação

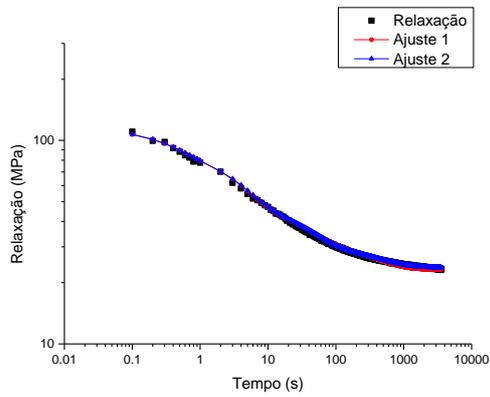
i	$\rho_i$	$E_i$
Ajuste 1		
1	4.00E-01	2.78E+01
2	4.00E+00	3.90E+01
3	4.00E+01	1.63E+01
4	4.00E+02	7.73E+00
Ajuste 2		
1	4.00E-01	2.82E+01
2	4.00E+00	3.80E+01
3	4.00E+01	1.77E+01
4	4.00E+02	6.10E+00
5	4.00E+03	8.99E-01



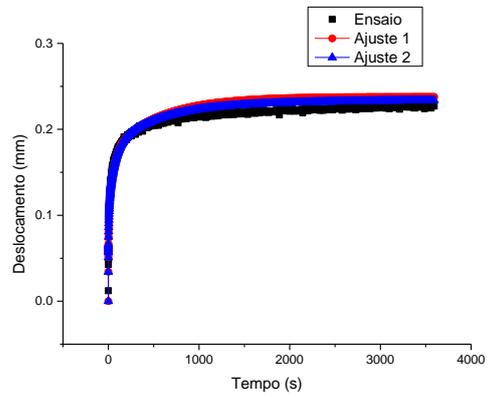
Resultados Experimentais



Resultados do Ajuste do *Creep Compliance*



Resultados do Ajuste do Módulo de Relaxação



Resultados do Deslocamento pós ABAQUS

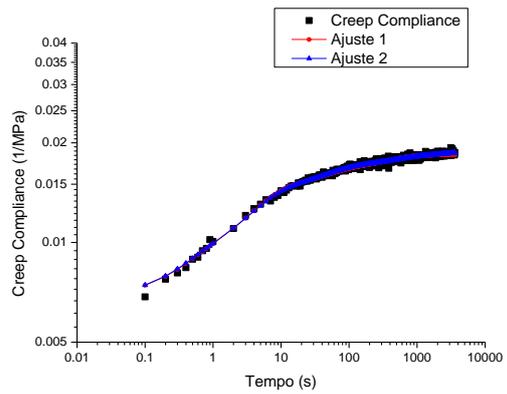
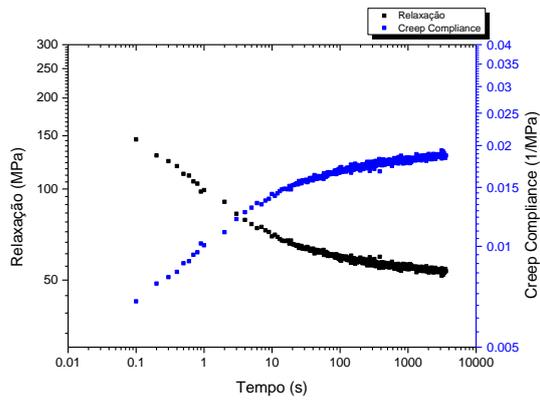
## Anexo II CP5 AAUQ

Serie de Prony Creep Compliance

i	$\tau_i$	Di
Ajuste 1		
1	4.00E-01	1.96E-03
2	4.00E+00	5.42E-03
3	4.00E+01	2.29E-03
4	4.00E+02	1.90E-03
Ajuste 2		
1	4.00E-01	2.03E-03
2	4.00E+00	5.20E-03
3	4.00E+01	2.62E-03
4	4.00E+02	1.36E-03
5	4.00E+03	1.00E-03

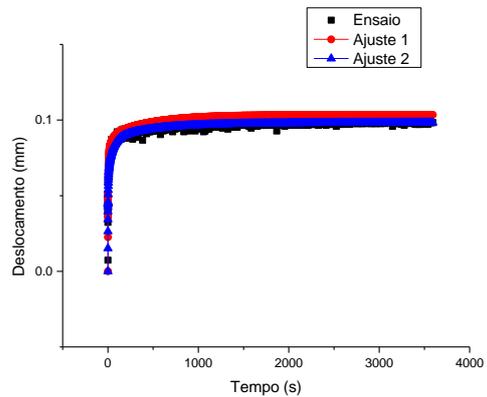
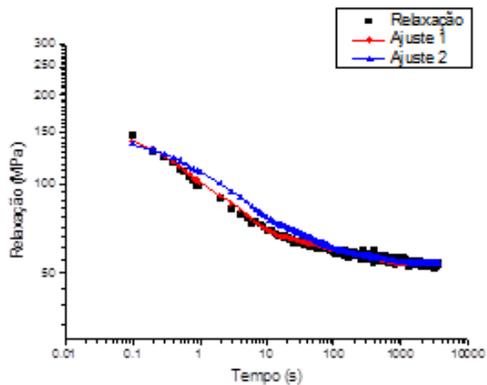
Serie de Prony Relaxação

i	$\rho_i$	Ei
Ajuste 1		
1	4.00E-01	4.48E+01
2	4.00E+00	3.71E+01
3	4.00E+01	7.87E+00
4	4.00E+02	7.90E+00
Ajuste 2		
1	4.00E-01	2.82E+01
2	4.00E+00	3.80E+01
3	4.00E+01	1.77E+01
4	4.00E+02	6.10E+00
5	4.00E+03	8.99E-01



Resultados Experimentais

Resultados do Ajuste do *Creep Compliance*



Resultados do Ajuste do Módulo de Relaxação

Resultados do Deslocamento pós ABAQUS

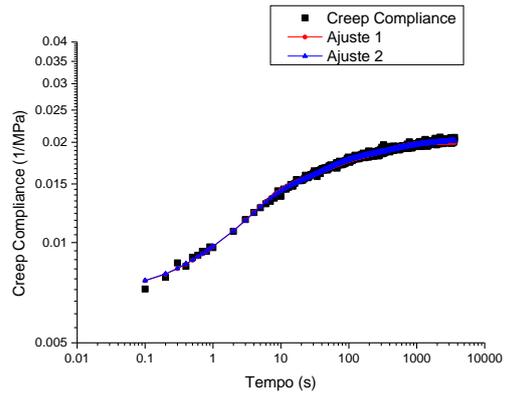
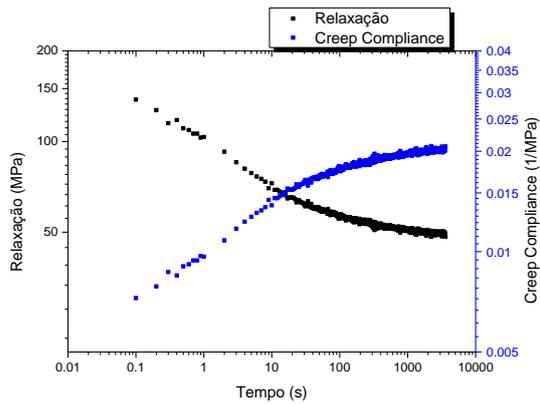
## Anexo III CP7 AAUQ

Serie de Prony Creep Compliance

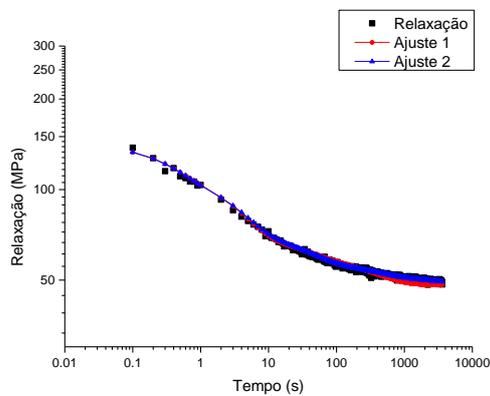
i	$\tau_i$	$D_i$
Ajuste 1		
1	4.00E-01	1.27E-03
2	4.00E+00	5.49E-03
3	4.00E+01	3.35E-03
4	4.00E+02	2.64E-03
Ajuste 2		
1	4.00E-01	1.34E-03
2	4.00E+00	5.26E-03
3	4.00E+01	3.70E-03
4	4.00E+02	2.07E-03
5	4.00E+03	1.07E-03

Serie de Prony Relaxação

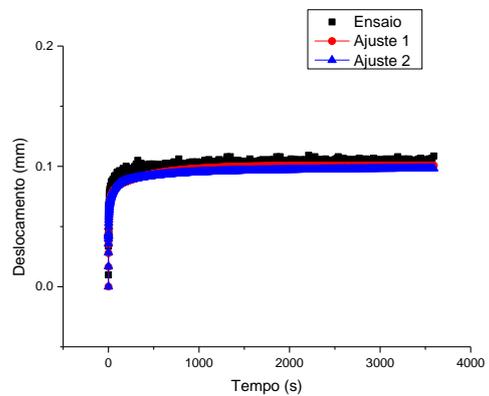
i	$\rho_i$	$E_i$
Ajuste 1		
1	4.00E-01	3.01E+01
2	4.00E+00	4.14E+01
3	4.00E+01	9.92E+00
4	4.00E+02	1.09E+01
Ajuste 2		
1	4.00E-01	3.14E+01
2	4.00E+00	3.85E+01
3	4.00E+01	1.41E+01
4	4.00E+02	5.92E+00
5	4.00E+03	2.76E+00



Resultados Experimentais



Resultados do Ajuste do Creep Compliance



Resultados do Ajuste do Módulo de Relaxação

Resultados do Deslocamento pós ABAQUS

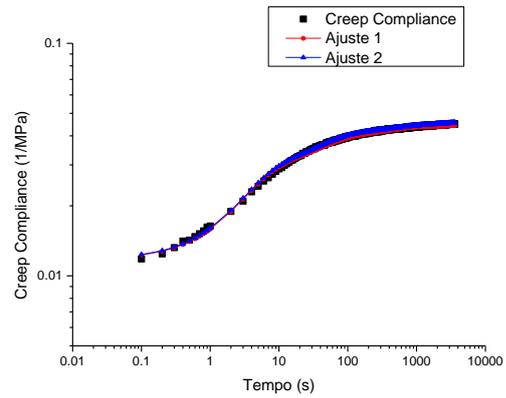
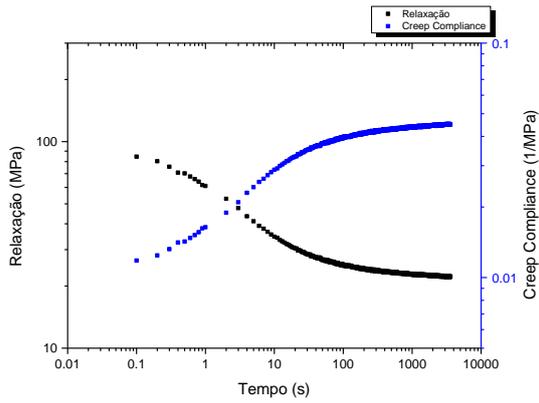
## Anexo IV CP8 AAUQ

Serie de Prony Creep Compliance

i	$\tau_i$	Di
Ajuste 1		
1	4.00E-01	2.67E-04
2	4.00E+00	1.60E-02
3	4.00E+01	1.10E-02
4	4.00E+02	5.16E-03
Ajuste 2		
1	4.00E-01	4.14E-04
2	4.00E+00	1.60E-02
3	4.00E+01	1.20E-02
4	4.00E+02	3.90E-03
5	4.00E+03	2.36E-03

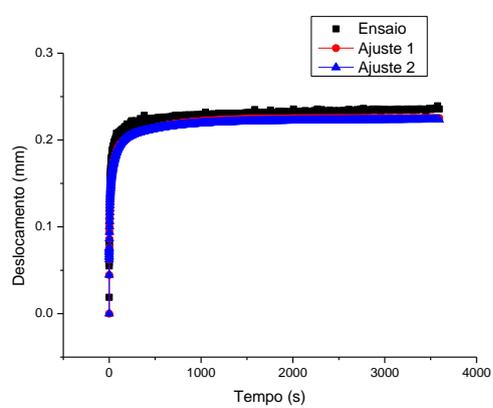
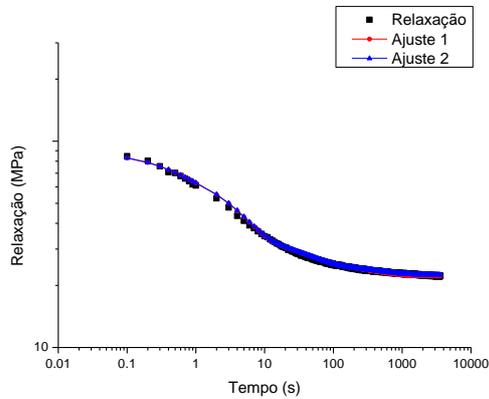
Serie de Prony Relaxação

i	$\rho_i$	Ei
Ajuste 1		
1	4.00E-01	1.85E+01
2	4.00E+00	3.58E+01
3	4.00E+01	8.00E+00
4	4.00E+02	3.40E+00
Ajuste 2		
1	4.00E-01	1.86E+01
2	4.00E+00	3.54E+01
3	4.00E+01	8.63E+00
4	4.00E+02	2.66E+00
5	4.00E+03	4.08E-01



Resultados Experimentais

Resultados do Ajuste do *Creep Compliance*



Resultados do Ajuste do Módulo de Relaxação

Resultados do Deslocamento pós ABAQUS

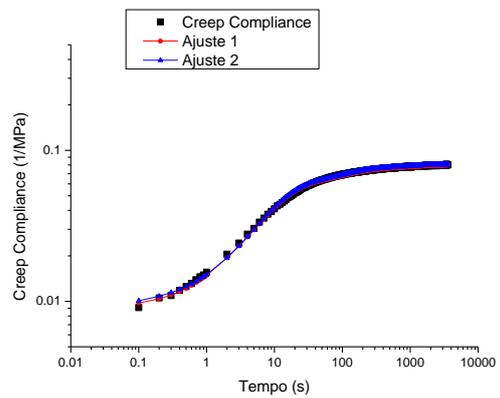
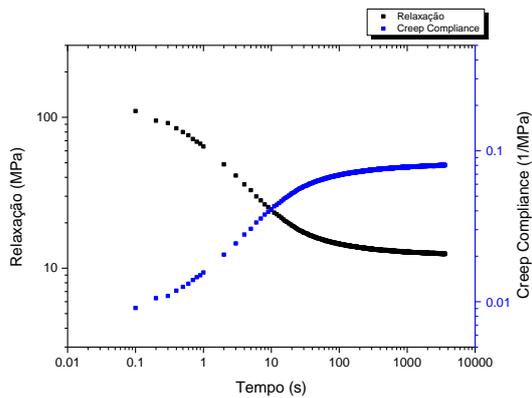
## Anexo V CP9 AAUQ

Serie de Prony Creep Compliance

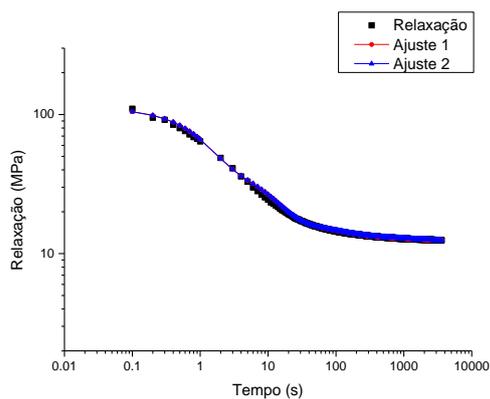
i	$\tau_i$	D <sub>i</sub>
Ajuste 1		
1	1.00E+00	2.07E-03
2	1.00E+01	4.50E-02
3	1.00E+02	1.80E-02
4	1.00E+03	6.07E-03
Ajuste 2		
1	1.00E-01	6.63E-04
2	1.00E+00	1.12E-03
3	1.00E+01	4.60E-02
4	1.00E+02	1.80E-02
5	1.00E+03	6.08E-03

Serie de Prony Relaxação

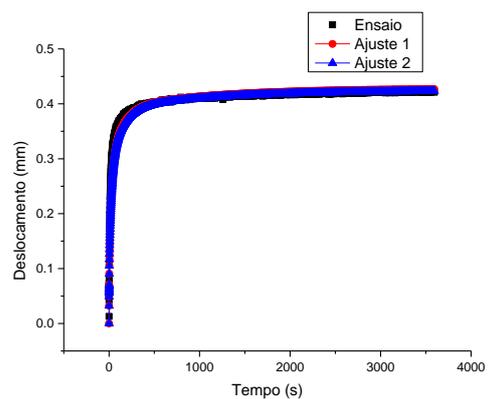
i	$\rho_i$	E <sub>i</sub>
Ajuste 1		
1	1.00E+00	6.74E+01
2	1.00E+01	2.71E+01
3	1.00E+02	3.42E+00
4	1.00E+03	1.07E+00
Ajuste 2		
1	1.00E-01	4.62E-01
2	1.00E+00	6.72E+01
3	1.00E+01	2.72E+01
4	1.00E+02	3.41E+00
5	1.00E+03	1.08E+00



Resultados Experimentais



Resultados do Ajuste do Creep Compliance



Resultados do Ajuste do Módulo de Relaxação

Resultados do Deslocamento pós ABAQUS

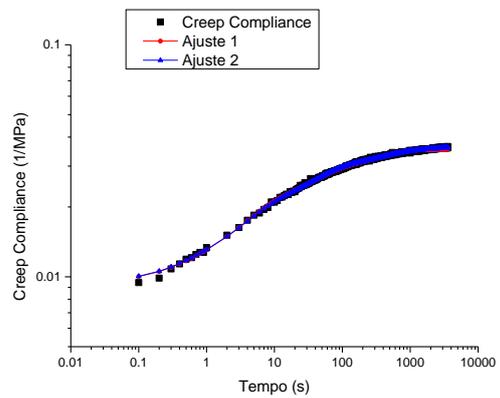
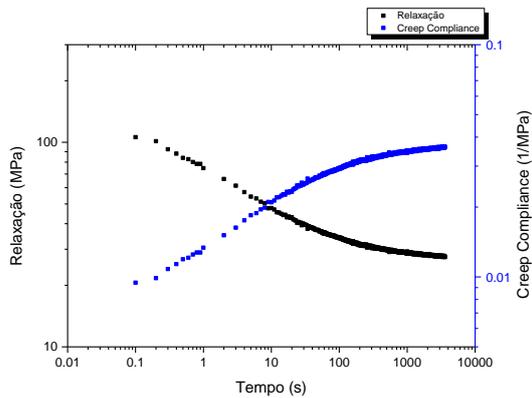
## Anexo VI CP10 AAUQ

Serie de Prony Creep Compliance

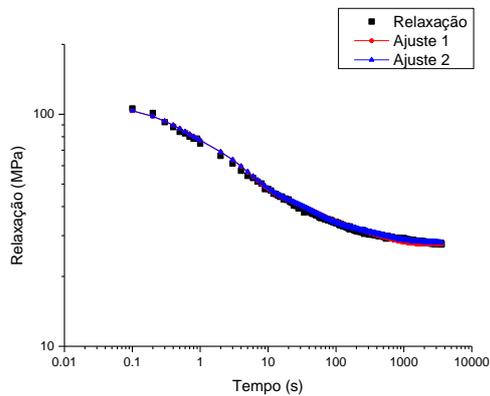
i	$\tau_i$	Di
Ajute 1		
1	4.00E-01	1.58E-03
2	4.00E+00	8.74E-03
3	4.00E+01	9.06E-03
4	4.00E+02	6.71E-03
Ajute 2		
1	4.00E-01	1.71E-03
2	4.00E+00	8.30E-03
3	4.00E+01	9.74E-03
4	4.00E+02	5.62E-03
5	4.00E+03	2.05E-03

Serie de Prony Relaxação

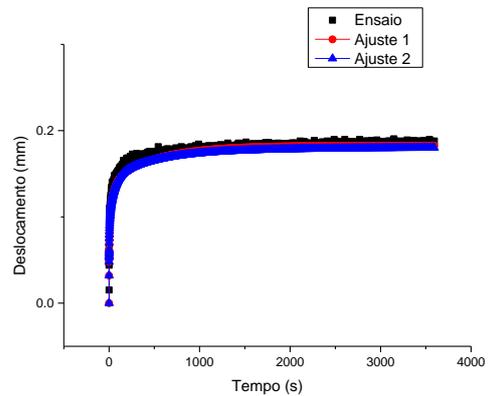
i	$\rho_i$	Ei
Ajute 1		
1	4.00E-01	2.72E+01
2	4.00E+00	3.54E+01
3	4.00E+01	1.28E+01
4	4.00E+02	7.42E+00
Ajute 2		
1	4.00E-01	2.76E+01
2	4.00E+00	3.44E+01
3	4.00E+01	1.42E+01
4	4.00E+02	5.73E+00
5	4.00E+03	9.30E-01



Resultados Experimentais



Resultados do Ajuste do Creep Compliance



Resultados do Ajuste do Módulo de Relaxação

Resultados do Deslocamento pós ABAQUS

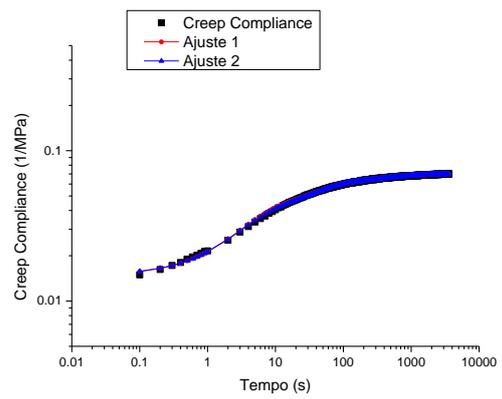
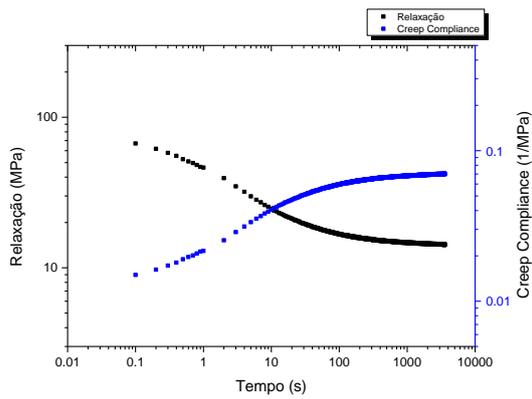
## Anexo VII CP11 AAUQ

Serie de Prony Creep Compliance

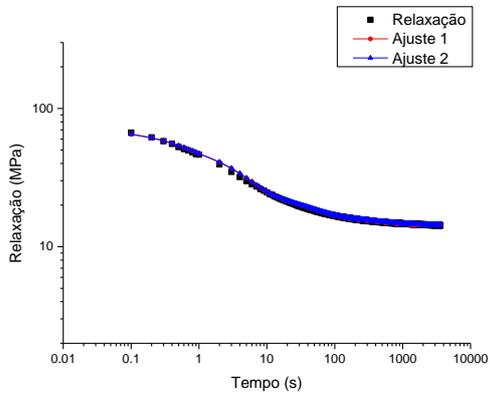
i	$\tau_i$	Di
Ajute 1		
1	4.00E-01	8.61E-04
2	4.00E+00	2.30E-02
3	4.00E+01	2.10E-02
4	4.00E+02	9.71E-03
Ajute 2		
1	4.00E-01	1.01E-03
2	4.00E+00	2.20E-02
3	4.00E+01	2.20E-02
4	4.00E+02	8.41E-03
5	4.00E+03	2.45E-03

Serie de Prony Relaxação

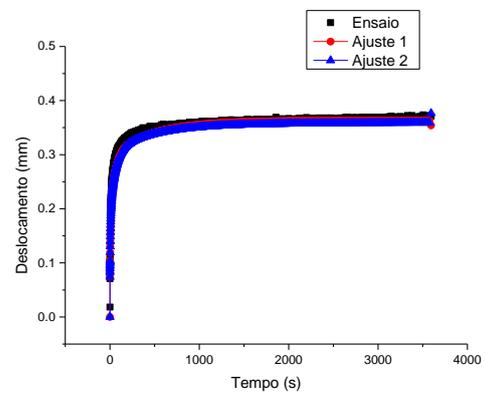
i	$\rho_i$	Ei
Ajute 1		
1	4.00E-01	1.74E+01
2	4.00E+00	2.80E+01
3	4.00E+01	7.29E+00
4	4.00E+02	2.61E+00
Ajute 2		
1	4.00E-01	1.75E+01
2	4.00E+00	2.78E+01
3	4.00E+01	7.67E+00
4	4.00E+02	2.16E+00
5	4.00E+03	2.47E-01



Resultados Experimentais



Resultados do Ajuste do Creep Compliance



Resultados do Ajuste do Módulo de Relaxação

Resultados do Deslocamento pós ABAQUS