

CONSTRUÇÃO DE CURVAS MESTRAS PARA MISTURAS ASFÁLTICAS POR MEIO DE ENSAIOS DE *CREEP*

Marcelo Silva Medeiros Junior

Jorge Barbosa Soares

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos – LMP

Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes – PETRAN

Universidade Federal do Ceará – UFC

RESUMO

A literatura internacional aponta uma tendência para a utilização de parâmetros reológicos na caracterização de ligantes e de metodologias capazes de considerar o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas na análise estrutural dos pavimentos. O objetivo de usar modelos constitutivos viscoelásticos é possibilitar de forma mais realista a previsão dos principais fatores de deterioração dos pavimentos asfálticos. O presente trabalho visa a realização de ensaios de *Creep* em misturas do tipo CBUQ, AAUQ e SMA à quatro diferentes temperaturas e a utilização dos resultados para a construção das respectivas curvas mestras para uma temperatura de referência.

ABSTRACT

There is a trend in the international literature for the use of rheological parameters for characterization of asphalt binders as well as methodologies that consider the viscoelastic nature of asphalt mixtures in the structural analysis of asphalt pavements. The objective of using viscoelastic constitutive models is to allow more realistic predictions of the main pavement distresses. The present work intends to perform *Creep* tests in HMA, Sand-Asphalt and SMA mixtures at four different temperatures and to use the results to construct the respective master curves at a reference temperature.

1. INTRODUÇÃO

A análise e o dimensionamento de estruturas de pavimentos têm evoluído historicamente de procedimentos empíricos simples, oriundos na maioria das vezes, da experiência pessoal de engenheiros e órgãos rodoviários, para métodos mecanísticos baseados na análise teórica do comportamento estrutural das diversas camadas que compõem o pavimento (MOTTA, 1996). Isso se deve a necessidade de um conhecimento mais realista das relações entre tensões e deformações oriundas dos carregamentos, bem como dos mecanismos mais comuns de deterioração de pavimentos, quais sejam, deformação permanente e trincamento por fadiga.

No método mecanístico de dimensionamento de pavimentos, a distribuição de tensões no revestimento, assim como nas demais camadas, bem como suas respectivas deformações, devem ser obtidas por meio de soluções fechadas ou através de métodos numéricos, a exemplo do método dos elementos finitos e do método dos elementos de contorno, dentre outros.

Uma abordagem que considere o efeito viscoso induzido pela presença de asfalto nas misturas é importante uma vez que os modelos mecanísticos de previsão de deformações permanentes hoje usados no país partem de respostas estruturais obtidas a partir de análises elásticas. Nessas análises o principal parâmetro relativo aos materiais na entrada de dados é o Módulo de Resiliência, inclusive para a camada asfáltica, sabidamente de comportamento influenciado pela viscosidade do ligante. Portanto, para que a modelagem se aproxime mais do comportamento real do material, é necessária a utilização de relações constitutivas viscoelásticas.

O presente trabalho teve como objetivo a obtenção de parâmetros viscoelásticos por meio do ensaio de *Creep* para 3 misturas distintas vislumbrando a comparação entre o efeito da granulometria no comportamento mecânico do pavimento na análise viscoelástica linear. Para tanto, os corpos de prova de cada tipo de mistura foram ensaiados a temperaturas de -10°C, 10°C, 25°C e 40°C, o que permitiu a construção da curva mestra para a temperatura de 25°C para as 3 misturas investigadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Viscoelasticidade Linear

Em viscoelasticidade existem basicamente duas maneiras de descrever as relações entre as tensões e deformações com o tempo (FERRY, 1980). Uma das abordagens consiste em se combinar um certo número de elementos representativos do comportamento elástico e viscoso do material como visto na Figura 1.

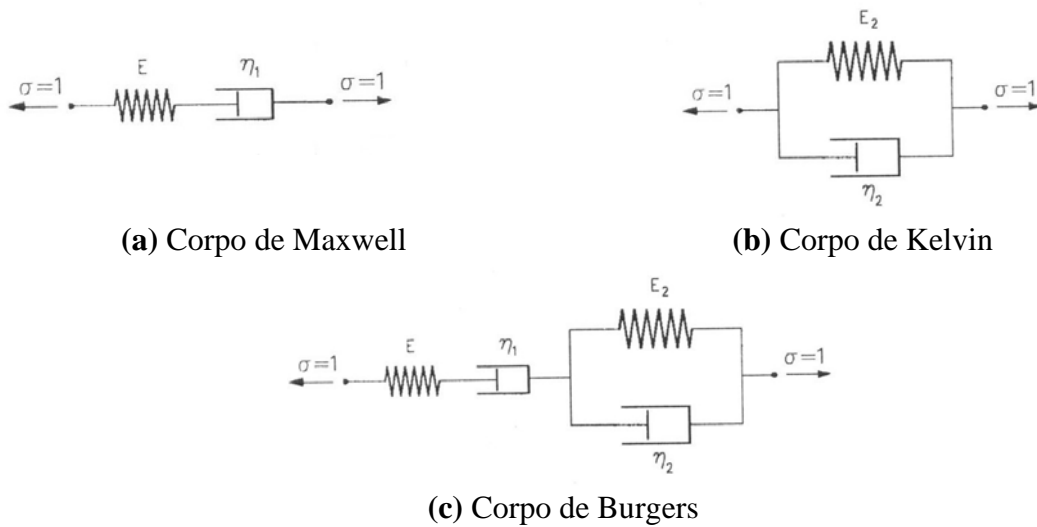


Figura 1: Modelos mecânicos.

Os modelos de Maxwell, Kelvin e Burgers são exemplos clássicos, sendo o último uma combinação dos dois primeiros. São comuns também os modelos generalizados de Maxwell e Kelvin (CHRISTENSEN, 1982), que nada mais são do que a adição de um número n que se queira de corpos em série. Esse tipo de combinação conduz a uma formulação diferencial do problema (Equação 1).

$$P\sigma = Q\varepsilon \quad (1)$$

Onde P e Q são operadores diferenciais lineares, definidos por:

$$P \equiv \sum_{j=0}^m p_j \frac{\partial^j}{\partial t^j} \quad (2)$$

$$Q \equiv \sum_{j=0}^n q_j \frac{\partial^j}{\partial t^j} \quad (3)$$

Na Tabela 1 encontram-se as formulações diferenciais de alguns modelos quando submetidos a estados uniaxiais de tensão e deformação.

Tabela 1: Equações diferenciais dos diversos modelos reológicos.

Modelo de Maxwell	Modelo de Kelvin	Modelo de Burgers
$\sigma + \frac{\eta}{R} \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \eta \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$	$\sigma = R\varepsilon + \eta \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$	$\sigma + p_1 \frac{\partial \sigma}{\partial t} + p_2 \frac{\partial \sigma^2}{\partial t^2} = q_1 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + q_2 \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial t^2}$

Porém, a resposta do material pode não ser a resposta obtida por modelos simples. Nestas situações mais elementos devem ser adicionados para se aproximar cada vez mais do comportamento real do material, como no caso dos modelos generalizados de Voigt e Burgers. Isso eleva a ordem das equações diferenciais resultantes e o número de constantes envolvidas (ZHANG *et al.*, 1997).

A outra alternativa é a formulação utilizando formas integrais, através de funções hereditárias, de relação entre tensões e deformações.

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} \partial \tau \quad (4)$$

$$\varepsilon(t) = \int_0^t J(t-\tau) \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} \partial \tau \quad (5)$$

onde $E(t)$: módulo de relaxação;
 $J(t)$: função fluência (*Creep compliance*);
 t : tempo; e
 τ : tempo de relaxação.

Essa abordagem tem a vantagem de não depender da adaptação de um modelo mecânico ao material em estudo, sendo baseado não nas propriedades de cada elemento, mas sim em funções do material (*Creep Compliance* ou Módulo de Relaxação).

2.2. O Ensaio de *Creep*

O ensaio de *Creep* é determinado aplicando-se uma carga de valor constante no corpo de prova (σ_0), e medindo as respectivas deformações com o tempo $\varepsilon(t)$. Essas deformações são usadas para calcular a fluência do material em função do tempo segundo a função $J(t) = \varepsilon(t) / \sigma_0$. O ensaio pode ser feito por compressão uniaxial ou por tração (Figura 2), sendo que os carregamentos podem ocorrer de maneira estática ou dinâmica.

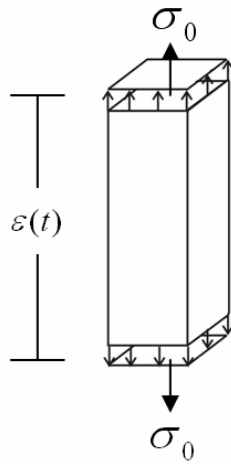


Figura 2. Ensaio de *Creep*.

Os materiais viscoelásticos têm propriedades mecânicas que variam com a temperatura. O princípio da superposição tempo-temperatura estabelece que as propriedades reológicas (a exemplo do *Creep* e Relaxação) obtidas para um intervalo de tempo a uma dada temperatura podem ser correlacionadas com outras, obtidas em temperaturas diferentes através de uma translação paralela no eixo do tempo, o que possibilita a formação de uma curva mestra para uma dada temperatura de referência, conforme ilustrado na Figura 3.

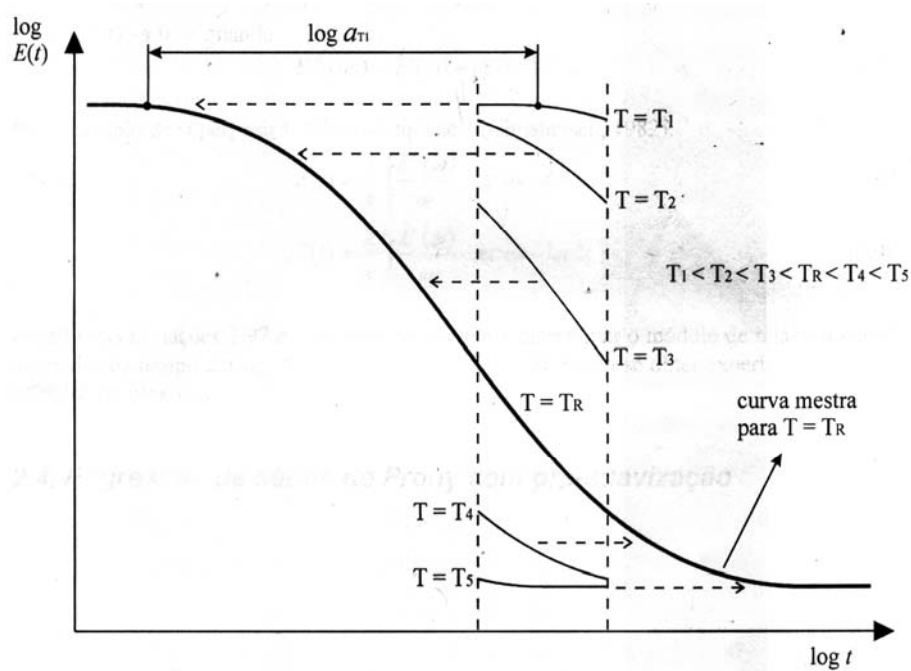


Figura 3. Curva mestra para ensaio de Relaxação (SOUZA, 2005).

Ao se efetuar as translações no eixo das coordenadas (a_t), os tempos passam a ser tempos reduzidos referentes à temperatura de referência (ξ). Esses novos intervalos de tempo são dados pela seguinte fórmula:

$$\xi = \frac{t}{a_t(T)} \quad (6)$$

Onde: ξ : tempo reduzido para uma temperatura de referência;
 $a_i(T)$: deslocamento horizontal da curva a uma dada temperatura T em relação à temperatura de referência;
 t : tempo para a temperatura original do ensaio.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foram analisadas 3 misturas sendo elas: uma mistura de AAUQ descrita em PINHEIRO (2004), e misturas de CBUQ e SMA descritas em VASCONCELOS (2004). Os ensaios foram realizados às temperaturas de -10°C , 10°C , 25°C e 40°C . Para as temperaturas de -10°C e 10°C os corpos de prova permaneceram em um *freezer* de plasma com regulagem de temperatura por um período de 24 horas para que a temperatura se estabilizasse. O nível de tensão utilizado para os ensaios foi de $1,0\text{kgf/cm}^2$ a fim de que o material se mantivesse no seu regime viscoelástico linear.

Os corpos de prova investigados têm dimensões de 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura e foram compactados em um compactador giratório do tipo SUPERPAVE. O ensaio é ilustrado na Figura 4.



Figura 4. Ensaio de *creep* a temperatura de 25°C .

4. RESULTADOS E ANÁLISE

Os resultados dos ensaios e a conseqüente construção das curvas mestras serviram para exemplificar a vantagem de se realizar os ensaios a várias temperaturas. As curvas foram montadas com deslocamentos horizontais (*Shift Factors*) mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Fatores de deslocamento.

	-10°C	10°C	25°C	40°C
AAUQ	220	30	1	0,08
CBUQ	1200	100	1	0,06
SMA	800	60	1	0,08

Pode-se observar nas Figuras 6, 8 e 10 que, através do princípio da superposição tempo-temperatura, podemos obter resultados variando da ordem de 10^{-3} até 10^4 segundos, utilizando-se para isso resultados de ensaios de duração de 6×10^2 segundos.

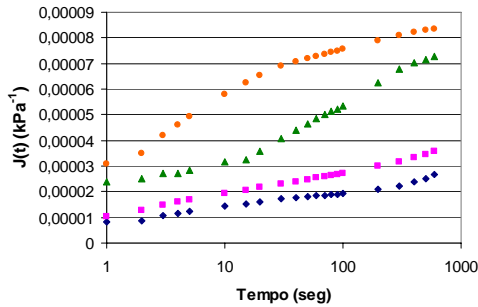


Figura 5. *Creep Compliance* de AAUQ

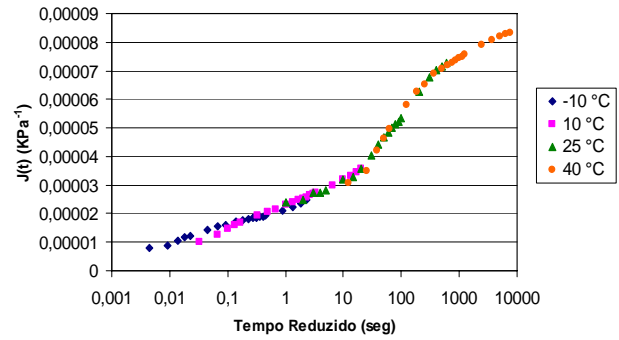


Figura 6. Curva Mestra de AAUQ

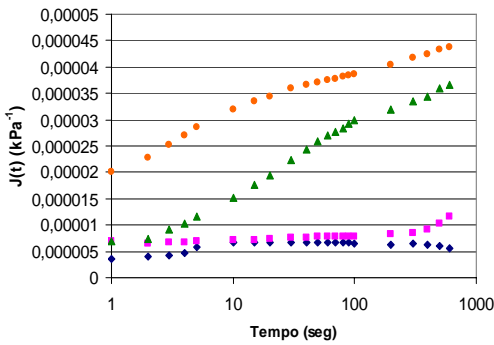


Figura 7. *Creep Compliance* de CBUQ.

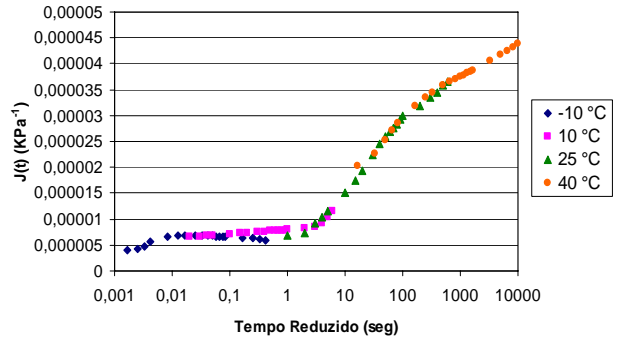


Figura 8. Curva Mestra de CBUQ.

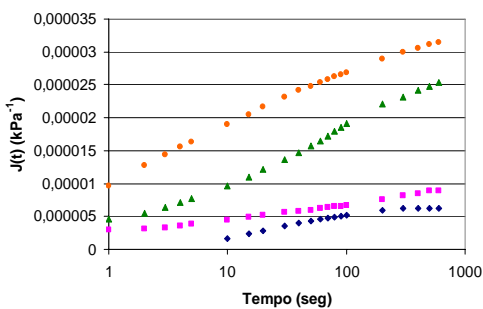


Figura 9. *Creep Compliance* de SMA.

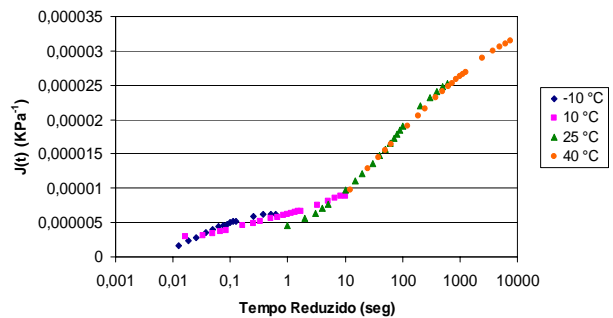


Figura 10. Curva Mestra de SMA.

Dos resultados dos ensaios se pode concluir que as deformações foram maiores no AAUQ seguidas pelas deformações do CBUQ. As deformações sofridas pelo SMA foram as menores observadas devido a maior parcela de material elástico (brita) quando comparado às outras 2 misturas como observado na Tabela 3.

Tabela 3: Deformações das misturas (mm/mm).

	-10°C	10°C	25°C	40°C
AAUQ	0,000960	0,00349	0,007138	0,008176
CBUQ	0,000557	0,00113	0,003587	0,004296
SMA	0,000212	0,00087	0,002482	0,003082

As 3 misturas apresentaram valores de tempo reduzido para uma faixa que variou de 10^{-3} até 10^4 segundos, o que significa que ao se realizar ensaios de 600 segundos de duração foi possível inferir o comportamento do material para um tempo de 10^4 segundos, o que significa uma praticidade operacional bastante significativa.

O presente trabalho também mostrou ser possível a obtenção de parâmetros viscoelásticos para tempos curtos (10^{-3} segundo), o que é bastante importante do ponto de vista de simulação computacional, haja vista que os *softwares* comerciais necessitam desses valores como entrada de dados, o que se justifica pelo fato das propriedades viscoelásticas obtidas para esses intervalos de tempo serem representativos da parcela elástica do material.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos – LMP/DET/UFC, e à CAPES e ao CNPq pelas respectivas bolsas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHRISTENSEN, R.M. (1982) *Theory of Viscoelasticity* (2ª ed.). Academic, New York.
- FERRY, J.D. (1980) *Viscoelastic properties of polymers* (3ª ed.). Wiley, New York.
- MOTTA, L. M. G., M. F. P. SÁ, P. M. F. OLIVEIRA e A. M. SOUSA (1996) O Ensaio de Creep Estático e Dinâmico na Avaliação das Misturas Asfálticas. Anais da 30ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPV, Salvador, p. 115-135.
- PINHEIRO, J. H. (2004). Incorporação de Borracha Moida de Pneu em Misturas Asfálticas de Diferentes Granulometrias (Processos Úmido e Seco). Dissertação de Mestrado, PETRAN Universidade Federal do Ceará.
- SOUZA, F.V. (2005). Modelo Multi-Escala para Análise Estrutural de Compósitos Viscoelásticos Suscetíveis ao Dano. . Dissertação de Mestrado, PETRAN, Universidade Federal do Ceará.
- VASCONCELOS, K.L. (2004). Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometrias. Dissertação de Mestrado, PETRAN, Universidade Federal do Ceará.
- ZHANG, W.; A. DRESCHER e D.E. NEWCOMB (1997) Viscoelastic Analysis of Diametral Compression of Asphalt Concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 123, p. 596-603.

Endereço dos Autores:

Universidade Federal do Ceará

Departamento de Engenharia de Transportes

Centro de Tecnologia

Campus do Pici – Bloco 703 s/n

Fortaleza, CE 60.455-760

e-mail: marcelojr@det.ufc.br jsoares@det.ufc.br