



MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA  
DEPARTAMENTO NACIONAL DE  
INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES  
DIRETORIA-GERAL  
DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E  
PESQUISA  
INSTITUTO DE PESQUISAS EM  
TRANSPORTES  
Setor de Autarquias Norte  
Quadra 03 Lota A  
Ed. Núcleo dos Transportes  
Brasília – DF – CEP 70040-902  
Tel./fax: (61) 3315-4831

SETEMBRO 2022

NORMA DNIT 439/2022 – ME

## Pavimentação – Ligante asfáltico – Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS – Linear Amplitude Sweep) – Método de ensaio

**Autor:** Instituto de Pesquisas em Transportes – IPR

**Processo:** 50600.028126/2019-76

**Aprovação pela Diretoria Colegiada do DNIT na reunião de 06/09/2022.**

*Direitos autorais exclusivos do DNIT, sendo permitida reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte (DNIT), mantido o texto original e não acrescentado nenhum tipo de propaganda comercial.*

### Palavras-chave:

Ligante asfáltico, resistência à fadiga, varredura de frequência, varredura de amplitude, DSR.

### Nº total de páginas

18

### Resumo

Este documento estabelece a sistemática a ser empregada na determinação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos, por meio da aplicação de um carregamento cíclico de cisalhamento com amplitudes linearmente crescentes. O ensaio é realizado no *Dynamic Shaer Rheometer* (DSR), a 19° C, com a geometria de placas paralelas de 8 mm e ajuste de abertura entre as placas de 2 mm. O ligante é previamente envelhecido no RTFOT. Inicialmente, realiza-se uma varredura de frequência para determinar as propriedades reológicas do ligante asfáltico. Posteriormente, aplica-se uma série de ciclos de carga oscilatória, com frequência constante e amplitudes linearmente crescentes, buscando promover o dano acelerado por fadiga. A partir das propriedades reológicas e dos resultados da varredura de amplitude obtidos, aplica-se a Mecânica do Dano Contínuo Viscoelástico para calcular a resistência à fadiga do ligante asfáltico.

### Abstract

This document establishes the procedure to evaluate the fatigue resistance of asphalt binders by means of a cyclic loading employing linearly increasing load amplitude. The test is performed in the Dynamic Shaer Rheometer (DSR) at 19° C using an 8-mm parallel plate geometry with 2-mm gap setting. The binder is first aged in the RTFOT. Initially, the sample is tested using a frequency sweep to

determine its rheological properties. Then the sample is tested using a series of oscillatory load cycles at linearly increasing amplitudes at a constant frequency to cause accelerated fatigue damage. From the rheological properties and the amplitude sweep results, the Viscoelastic Continuum Damage Model is applied to calculate the fatigue resistance of the asphalt binder.

### Sumário

|  |    |
|--|----|
| Prefácio .....   | 2  |
| 1 Objetivo .....   | 2  |
| 2 Referências normativas .....   | 2  |
| 3 Definições .....   | 2  |
| 4 Equipamentos .....   | 3  |
| 5 Amostra .....  | 3  |
| 6 Ensaio .....   | 3  |
| 7 Cálculo e interpretação dos resultados .....                                 | 4  |
| 8 Relatório .....  | 7  |
| Anexo A (Informativo) – Exemplos de gráficos do ensaio LAS .....               | 8  |
| Anexo B (Informativo) – Exemplo de cálculo e interpretação do ensaio LAS ..... | 10 |
| Anexo C (Informativo) – Bibliografia .....                                     | 17 |
| Índice Geral .....   | 18 |

## Prefácio

A presente Norma foi preparada pelo Instituto de Pesquisas em Transportes – IPR/DPP, para servir como documento base, visando estabelecer a sistemática empregada na determinação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos, por meio da aplicação de um carregamento cíclico de cisalhamento com amplitudes linearmente crescentes. A criação desta norma procede dos estudos e pesquisas realizados no âmbito do Termo de Execução Descentralizada – TED nº 682/2014 firmado com a COPPE/UFRJ, para o desenvolvimento de método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimento asfáltico. Está formatada de acordo com a norma DNIT 001/2009 – PRO.

## 1 Objetivo

Esta norma estabelece a sistemática a ser empregada na determinação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos, por meio da aplicação de um carregamento cíclico de cisalhamento com amplitudes linearmente crescentes.

## 2 Referências normativas

Os documentos relacionados a seguir são indispensáveis à aplicação desta norma. Para referências datadas, aplicam-se somente as edições citadas. Para referências não datadas, aplicam-se as edições mais recentes do referido documento (incluindo emendas):

- a) AMERICAN SOCIETY FOR TEST AND MATERIALS. ASTM D7175-15 – Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer.
- b) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15235 – Materiais asfálticos – Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional.

## 3 Definições

Para os efeitos deste documento, aplicam-se os seguintes termos e definições:

### 3.1 Materiais viscoelásticos

Materiais que, ao serem submetidos a deformações, apresentam comportamento com características

viscosas e elásticas simultaneamente.

### 3.2 Regime viscoelástico linear

Região de comportamento dos materiais viscoelásticos na qual as propriedades mecânicas fundamentais do material dependem da temperatura e do tempo de carregamento (ou frequência) e independem da magnitude do carregamento.

### 3.3 Carregamento oscilatório

Carregamento cíclico com formato senoidal no qual a amplitude da carga aplicada varia em torno de um valor específico. No caso desta norma, a amplitude varia em torno de zero.

### 3.4 Módulo dinâmico de cisalhamento ( $|G^*|$ )

Razão entre a amplitude de tensão de cisalhamento e a amplitude de deformação de cisalhamento, para um material viscoelástico linear submetido a carregamento oscilatório.

### 3.5 Ângulo de fase ( $\delta$ )

Ângulo de defasagem entre o carregamento aplicado e a resposta resultante para um material viscoelástico linear submetido a carregamento oscilatório. É a medida do atraso que existe entre a solicitação e a resposta mecânica.

### 3.6 Dano Contínuo Viscoelástico – *Viscoelastic Continuum Damage (VECD)*

Modelo constitutivo de dano para materiais viscoelásticos, baseado na termodinâmica de processos irreversíveis com variáveis internas de estado e no princípio de correspondência elástico-viscoelástico.

### 3.7 Parâmetro Alfa ( $\alpha$ )

Constante relacionada às propriedades viscoelásticas lineares do ligante asfáltico, utilizada para o cálculo do dano pela teoria VECD.

### 3.8 Pseudodeformação ( $\gamma^R$ )

Variável matemática utilizada para estabelecer o princípio de correspondência elástico-viscoelástico.

### 3.9 Dano Contínuo Viscoelástico Simplificado – *Simplified Viscoelastic Continuum Damage (S-VECD)*

Uma variação do modelo VECD que simplifica o cálculo das pseudodeformações e assume que o dano ocorre em estado estacionário.

## 4 Equipamentos

### 4.1 Estufa de Filme Fino Rotativo (RTFOT)

Estufa de convecção elétrica, com insuflação forçada de ar, com paredes duplas, capaz de manter a temperatura de  $(163,0 \pm 0,5)$  °C. Deve ser provida internamente de um carrossel vertical, adequado para suportar os recipientes de amostra, conforme a norma ABNT NBR 15235.

### 4.2 Reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR – *Dynamic Shear Rheometer*)

O reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) deve ser composto por um dispositivo de aplicação de carga, um sistema de controle e aquisição de dados, placas metálicas paralelas e uma câmara para controlar a temperatura da amostra durante o ensaio. O fabricante do equipamento deve emitir um certificado garantindo que a frequência, o ângulo de fase e o torque são controlados, medidos ou ambos, com acurácia de 1 % ou menos na faixa desta medição (erro  $\leq 1$  %). O reômetro deverá ser capaz de executar o ensaio em modo de controle de tensão ou de deformação. O equipamento e seus acessórios estão descritos na norma ASTM D7175-15.

## 5 Amostra

Para evitar problemas de instabilidade de fluxo na amostra e falhas na adesividade entre a amostra e os pratos metálicos da geometria do DSR, os ligantes asfálticos submetidos ao procedimento de ensaio descrito nesta norma devem apresentar, preferencialmente, valores de  $|G^*|$  maiores que 10 MPa e menores que 70 MPa, nas condições do ensaio (10 Hz e 19 °C, após o RTFOT).

NOTA 1: Caso o  $|G^*|$  do ligante nas condições do ensaio esteja fora do intervalo indicado, deve-se alterar a temperatura do ensaio para que o

$|G^*|$  fique dentro do intervalo de 15 MPa e 25 MPa.

## 6 Ensaio

O ensaio *Linear Amplitude Sweep* (LAS) avalia o comportamento de fadiga de ligantes asfálticos pela aplicação de um carregamento oscilatório com amplitudes de carga linearmente crescentes. O ensaio é realizado em duas etapas, executadas sucessivamente. A primeira consiste em uma varredura de frequência, com a qual se determinam as propriedades viscoelásticas lineares do ligante asfáltico. A segunda consiste em uma varredura de amplitude, realizada para determinar as propriedades de dano no material.

### 6.1 Preparação da amostra

Efetuar o envelhecimento da amostra de ligante asfáltico de acordo com a norma ABNT NBR 15235.

Preparar a amostra do ensaio de acordo com a norma ASTM D7175-15, usando a geometria de placas paralelas de 8 mm de diâmetro com um espaçamento entre as placas de 2 mm.

NOTA 2: A temperatura da geometria de placas paralelas deve ser aumentada para pelo menos 60 °C, antes de inserir a amostra, de modo a garantir a adesão, especialmente para ligantes asfálticos altamente modificados.

Condicionar a amostra na temperatura de 19 °C e seguir a norma ASTM D7175-15 para utilização do DSR.

### 6.2 Varredura de frequência

Com a amostra a 19 °C, aplicar um carregamento cisalhante oscilatório, em modo de controle de deformação, com amplitude de deformação constante de 0,1 % e diferentes frequências de carregamento.

Devem-se utilizar as seguintes frequências, em Hz: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 2,0; 4,0; 6,0; 8,0; 10; 20 e 30. Para cada uma das 12 frequências, registrar os valores de  $|G^*|$  e de  $\delta$ . A Figura A1 (Anexo A) apresenta um exemplo dos resultados do ensaio de varredura de frequência.

Os valores de  $|G^*|$  e  $\delta$ , determinados pela varredura de frequência, são utilizados para calcular o parâmetro  $\alpha$ ,

que representa as propriedades viscoelásticas do ligante asfáltico não danificado.

### 6.3 Varredura de amplitude

Com a mesma amostra a 19 °C, aplicar um carregamento cisalhante oscilatório, em modo de controle de deformação, com frequência de carregamento constante de 10 Hz e diferentes amplitudes de deformação.

A varredura de amplitude é realizada aumentando linearmente a amplitude de deformação oscilatória do carregamento de 0,1 % até 30 %, ao longo de 3100 ciclos de carregamento. A Figura A2 do Anexo A apresenta o esquema de carregamento para ensaio de varredura de amplitude.

A cada 10 ciclos de carga, registrar o  $|G^*|$ , o pico de tensão, o pico de deformação, o tempo e o  $\delta$ .

## 7 Cálculo e interpretação dos resultados

Esta seção apresenta o procedimento para calcular e interpretar os resultados do ensaio LAS. O anexo B apresenta um exemplo de aplicação deste procedimento.

### 7.1 Cálculo do parâmetro alfa

A partir dos resultados do ensaio de varredura de frequência, calcular o módulo de estocagem, para cada frequência, pela Equação 1:

$$G'(\omega) = |G^*|(\omega) \times \cos\delta(\omega) \quad (1)$$

Onde:

$\omega$  é a frequência angular do carregamento, expresso em radianos por segundo (rad/s);

$G'(\omega)$  é o módulo de estocagem para a frequência angular do carregamento, expresso em Pascal (Pa);

$|G^*|(\omega)$  é o módulo dinâmico de cisalhamento para a frequência angular do carregamento, expresso em Pascal (Pa);

$\delta(\omega)$  é o ângulo de fase para a frequência angular do carregamento, expresso em graus.

Plotar um gráfico com o logaritmo de base 10 da

frequência angular no eixo horizontal e o logaritmo de base 10 do módulo de estocagem no eixo vertical e fazer um ajuste linear dos dados utilizando a Equação 2:

$$\text{Log } G'(\omega) = m \times \text{Log } \omega + n \quad (2)$$

Onde:

$\text{Log}$  é o logaritmo na base 10;

$G'(\omega)$  é o módulo de estocagem para a frequência angular do carregamento, expresso em Pascal (Pa);

$\omega$  é a frequência angular do carregamento, expresso em radianos por segundo (rad/s);

$m$  é a inclinação da linha de ajuste;

$n$  é o intercepto da linha de ajuste.

A partir da inclinação da curva de ajuste, calcula-se o parâmetro alfa, pela Equação 3:

$$\alpha = 1/m \quad (3)$$

Onde:

$m$  é a inclinação da linha de ajuste;

$\alpha$  é o parâmetro que representa as propriedades viscoelásticas do ligante asfáltico não danificado.

### 7.2 Cálculo da curva característica de dano

A partir dos resultados do ensaio de varredura de amplitude, calcular a integridade da amostra para cada ponto de dados ( $i$ ), pela Equação 4:

$$C_i = \frac{|G^*|_i}{|G^*|_{inicial}} \quad (4)$$

Onde:

$i$  é o índice que indica o ponto de dados atual;

$C$  é a integridade da amostra em um ponto, adimensional;

$|G^*|$  é o módulo dinâmico de cisalhamento em um ponto, expresso em Pascal (Pa);

$|G^*|_{inicial}$  é o módulo dinâmico de cisalhamento do

ligante asfáltico não danificado, expresso em Pascal (Pa).

NOTA 3: Considera-se que o segundo ponto de dados registrado é o ponto inicial, portanto,  $|G^*|_{inicial}$  é igual ao valor de  $|G^*|$  para o segundo ponto.

Calcular o incremento de dano para cada ponto de dados (i) utilizando a Equação 5:

$$\Delta D_i = [\pi \gamma_i^2 (C_{i-1} - C_i)]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (5)$$

Onde:

$i$  é o índice que indica o ponto de dados atual;

$i - 1$  é o índice que indica o ponto de dados anterior;

$\Delta D$  é o incremento de dano em um ponto, adimensional;

$\pi$  é o número irracional (3,14159...);

$\gamma$  é a amplitude de deformação cisalhante em um ponto, expressa em porcentagem (%);

$C$  é a integridade da amostra em um ponto, adimensional;

$t$  é o tempo em um ponto, em segundos (s);

$\alpha$  é o parâmetro que representa as propriedades viscoelásticas do ligante asfáltico não danificado.

Calcular o dano acumulado em cada ponto de dados (i) utilizando a Equação 6 ou a Equação 7:

$$\text{Se } C_i \geq C_{i-1}, D_i = D_{i-1} + \Delta D_i \quad (6)$$

$$\text{Se } C_i < C_{i-1}, D_i = D_{i-1} + \Delta D_i \quad (7)$$

Onde:

$i$  é o índice que indica o ponto de dados atual;

$i - 1$  é o índice que indica o ponto de dados anterior;

$C$  é a Integridade da amostra em um ponto, adimensional;

$\Delta D$  é o Incremento de dano em um ponto, adimensional;

$D$  é o Dano total acumulado em um ponto, adimensional.

NOTA 4: Considera-se que o segundo ponto de dados registrado é o ponto inicial, portanto, neste ponto, o dano é igual a zero ( $D = 0$ ) e a integridade é igual a um ( $C = 1$ ).

Plotar em um gráfico a curva  $C(t)$  versus  $D(t)$ , com a integridade no eixo vertical e o dano no eixo horizontal, e ajustar os dados utilizando a Equação 8:

$$C(t) = C_0 - C_1(D(t))^{C_2} \quad (8)$$

Onde:

$t$  é o tempo, em segundos (s);

$C(t)$  é a integridade em função do tempo, adimensional;

$C_0$  é o valor inicial de  $C$  ( $C_0 = 1$ );

$D(t)$  é o dano em função do tempo, adimensional;

$C_1$  e  $C_2$  são coeficientes de regressão.

Os coeficientes de regressão podem ser calculados a partir da linearização da Equação 8, conforme apresentado na Equação 9:

$$\log(C_0 - C(t)) = \log(C_1) + C_2 \log(D(t)) \quad (9)$$

Onde:

$t$  é o tempo, em segundos (s);

$C(t)$  é a integridade em função do tempo, adimensional;

$C_0$  é o valor inicial de  $C$  ( $C_0 = 1$ );

$D(t)$  é o dano em função do tempo, adimensional;

$C_1$  e  $C_2$  são coeficientes de regressão.

Usando a Equação 9,  $C_1$  é igual ao inverso do logaritmo do intercepto e  $C_2$  é igual à inclinação da reta formada plotando os valores de  $\log(C_0 - C(t))$  versus  $\log(D(t))$ , desconsiderando valores de  $D(t)$  inferiores a 10.

NOTA 5: A teoria S-VECD não deve ser aplicada após a ruptura do material. Portanto, o ajuste da

curva  $C(t)$  versus  $D(t)$  deve ser feito utilizando apenas os dados até o ponto de ruptura. A ruptura é definida conforme 7.3.

A curva  $C(t)$  versus  $D(t)$ , assim determinada, representa a curva característica de dano do ligante asfáltico.

### 7.3 Critério de ruptura

O critério de ruptura utilizado para o ensaio LAS é o de máxima pseudoenergia de deformação.

Para determinar o ponto ruptura, inicialmente, calcular a pseudodeformação para cada ponto de dados ( $i$ ), a partir dos resultados do ensaio de varredura de amplitude, pela Equação 10:

$$\gamma_i^R = \frac{\gamma_i}{100} \times |G^*|_{inicial} \quad (10)$$

Onde:

$i$  é o índice que indica o ponto de dados atual;

$\gamma^R$  é a pseudodeformação em um ponto, expressa em Pascal (Pa);

$\gamma$  é a amplitude de deformação cisalhante em um ponto, expressa em porcentagem (%);

$|G^*|_{inicial}$  é o módulo dinâmico de cisalhamento do ligante asfáltico não danificado, em Pascal (Pa).

A partir da pseudodeformação, calcula-se a pseudoenergia de deformação, para cada ponto de dados ( $i$ ), utilizando a Equação 11:

$$W_i^R = 0,5 \times C_i \times (\gamma_i^R)^2 \quad (11)$$

Onde:

$i$  é o índice que indica o ponto de dados atual;

$W^R$  é a pseudoenergia de deformação em um ponto, expressa em Pascal ao quadrado (Pa<sup>2</sup>);

$\gamma^R$  é a pseudodeformação em um ponto, expressa em Pascal (Pa);

$C$  é a Integridade da amostra em um ponto, adimensional.

A partir dos valores calculados, identificar o ponto de máxima pseudoenergia de deformação. Este será definido como o ponto em que ocorre a ruptura do ensaio.

### 7.4 Cálculo da curva de fadiga

Após a definição do ponto de ruptura, identificar a integridade correspondente a este ponto ( $C_f$ ) e calcular o dano teórico na ruptura, a partir da Equação 12:

$$D_f = \left( \frac{C_0 - C_f}{C_1} \right)^{1/C_2} \quad (12)$$

Onde:

$D_f$  é o dano na ruptura;

$C_f$  é a integridade do ponto em que ocorre a ruptura;

$C_0$  é o valor inicial de  $C$  ( $C_0 = 1$ );

$C_1$  e  $C_2$  são coeficientes de regressão da Equação 8.

Calcular os coeficientes  $A$  e  $B$  da curva de fadiga do ligante, utilizando as Equações 13, 14 e 15:

$$A = \frac{F \cdot (D_f)^k}{k \cdot (\pi \cdot C_1 \cdot C_2)^\alpha} \quad (13)$$

$$k = 1 + (1 + C_2)\alpha \quad (14)$$

$$B = -2\alpha \quad (15)$$

Onde:

$A$  e  $B$  são coeficientes da curva de fadiga;

$C_1$  e  $C_2$  são coeficientes de regressão da Equação 8;

$\alpha$  é o parâmetro que representa as propriedades viscoelásticas do ligante asfáltico não danificado;

$F$  é a frequência de carregamento, expresso em Hertz (Hz), e definido por  $F = 10 \text{ Hz}$ ;

$\pi$  é o número irracional 3,14159...;

$D_f$  é o dano na ruptura.

Com os coeficientes  $A$  e  $B$ , obtém-se a curva de fadiga do ligante asfáltico, representada pela Equação 16:

$$N_f = A \times (\gamma)^B \quad (16)$$

Onde:

$A$  e  $B$  são os coeficientes da curva de fadiga;

$N_f$  é o número de ciclos até a ruptura;

$\gamma$  é a deformação cisalhante aplicada, expressa em porcentagem (%).

A curva de fadiga, assim determinada, permite estimar a ruptura por fadiga do ligante asfáltico, em função da deformação de cisalhamento aplicada.

### 7.5 Cálculo do Fator de Fadiga

O fator de fadiga do ligante ( $FFL$ ) representa a área abaixo da curva de fadiga, entre as deformações de 1,25 % e 2,50 %. O  $FFL$  é calculado pela Equação 17:

$$FFL = \frac{\text{Log}(N_{f1,25} \times N_{f2,5})}{2} \times \text{Log} \left( \frac{0,0250}{0,0125} \right) \quad (17)$$

Onde:

$FFL$  é o fator de fadiga do ligante a 19 °C;

$\text{Log}$  é o logaritmo na base 10;

$N_{f1,25}$  é o número de ciclos até a ruptura, calculado pela

Equação 16 para uma deformação cisalhante de 1,25 %;

$N_{f2,5}$  é o Número de ciclos até a ruptura, calculado pela Equação 16 para uma deformação cisalhante de 2,50 %.

## 8 Relatório

O relatório deverá conter as seguintes informações:

- a) A identificação completa da amostra;
- b) A temperatura do ensaio, com precisão de 0,1 °C;
- c) O  $|G^*|$  do ligante na temperatura do ensaio;
- d) O  $|G^*|$  do ligante a 19 °C, caso o ensaio seja realizado com outra temperatura;
- e) Os coeficientes  $C_1$  e  $C_2$  da curva característica de dano, com quatro algarismos significativos;
- f) O ciclo em que ocorreu a ruptura, em número inteiro;
- g) A máxima pseudoenergia de deformação, com quatro algarismos significativos;
- h) A integridade do ponto em que ocorre a ruptura, com quatro algarismos significativos;
- i) Os coeficientes  $A$  e  $B$  da curva de fadiga, com quatro algarismos significativos;
- j) O Fator de fadiga do ligante.

\_\_\_\_\_/Anexo A

Anexo A (Informativo) – Exemplos de gráficos do ensaio LAS

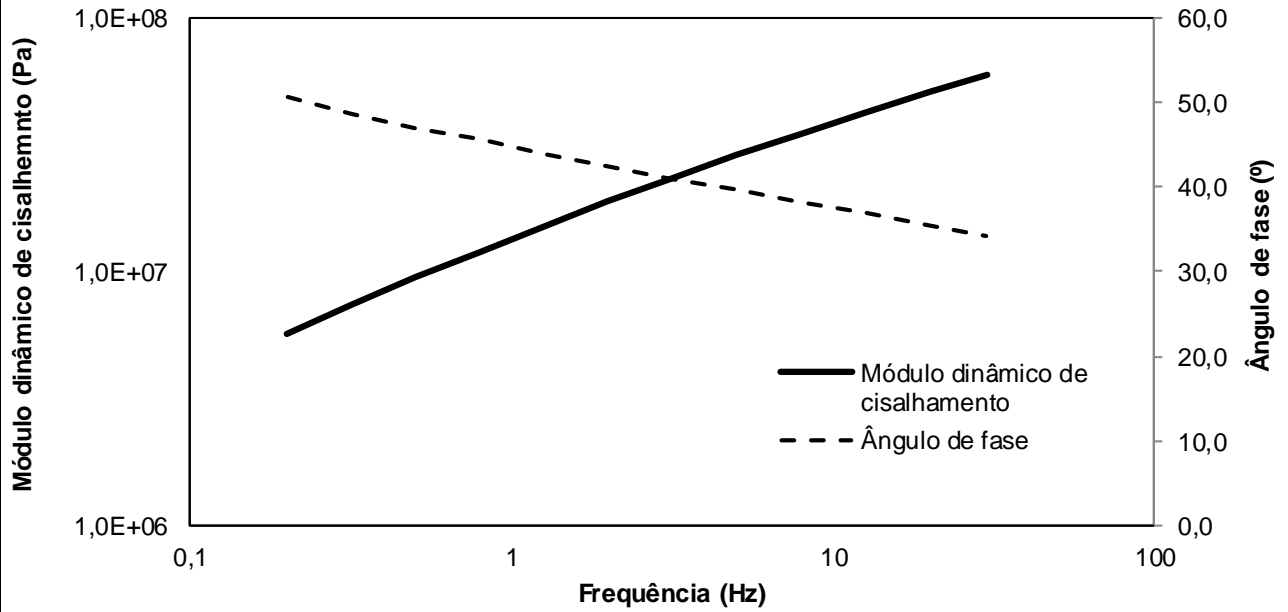


Figura A1 – Exemplo de resultados do ensaio de varredura de frequências

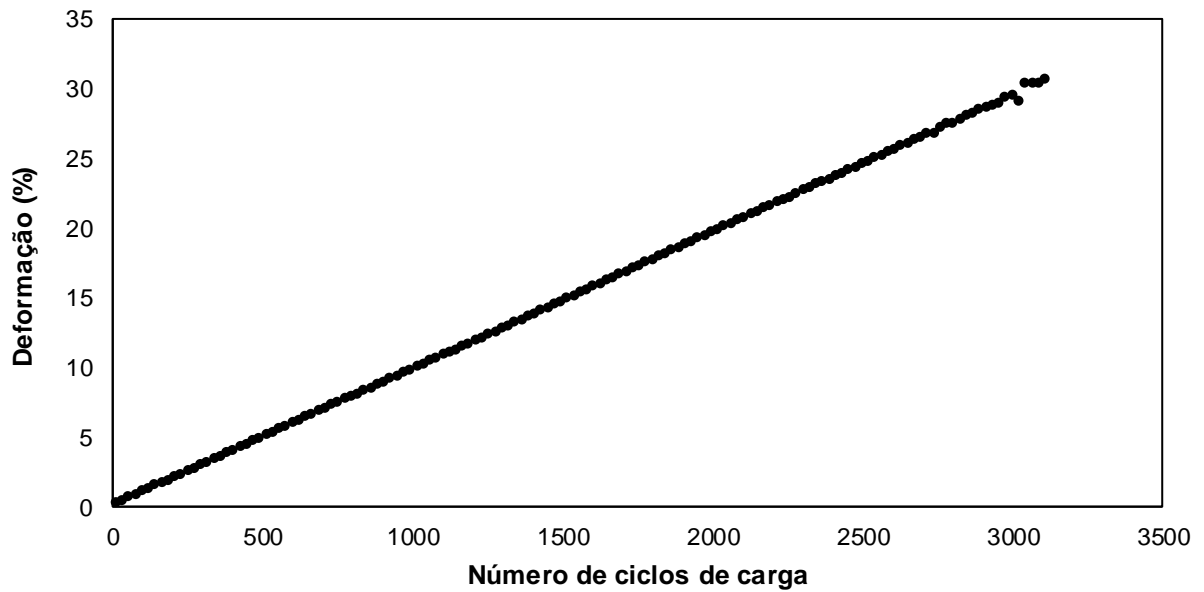


Figura A2 – Esquema de carregamento para o ensaio de varredura de amplitudes



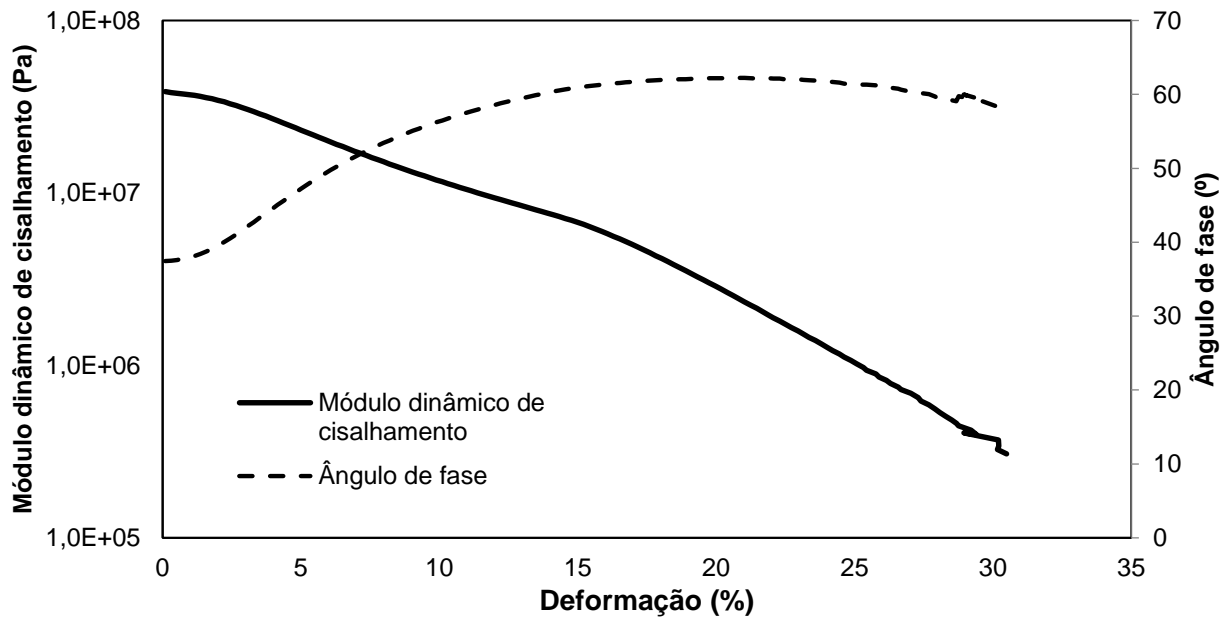


Figura A3 – Exemplo de resultados do ensaio de varredura de amplitudes

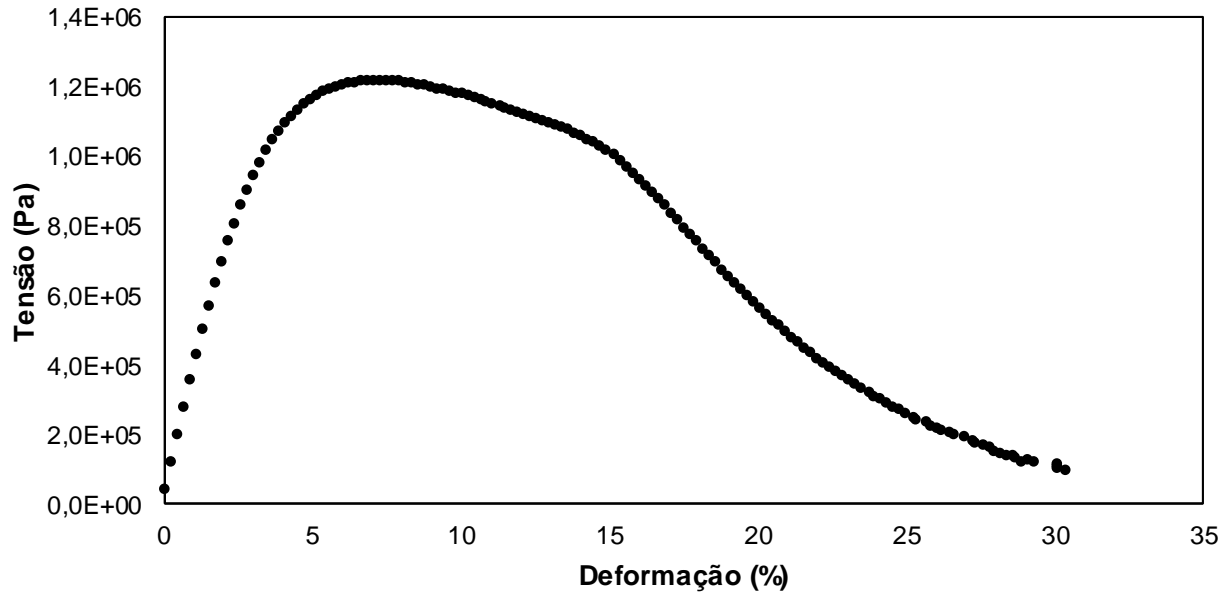


Figura A4 – Exemplo de curva tensão-deformação do ensaio de varredura de amplitudes

### Anexo B (Informativo) – Exemplo de cálculo e interpretação do ensaio LAS

Esta seção apresenta um exemplo de aplicação do procedimento para calcular e interpretar os resultados do ensaio LAS.

#### Cálculo do parâmetro alfa

Os resultados do ensaio de varredura de frequência deste exemplo estão nas colunas em cinza da Tabela B1. Os gráficos destes resultados estão na Figura A1 do Anexo A.

**Tabela B1 – Dados e cálculos do ensaio de varredura de frequências**

| Ponto | <i>F</i><br>(Hz) | $ G^* $<br>(Pa) | $\delta$<br>(°) | <i>G'</i><br>(Pa) | <i>Log</i> ( $\omega$ )<br>(rad/s) | <i>Log</i> ( <i>G'</i> )<br>(Pa) |
|-------|------------------|-----------------|-----------------|-------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 1     | 0,20             | 5,69E+06        | 50,6            | 3,61E+06          | 0,10                               | 6,56                             |
| 2     | 0,32             | 7,47E+06        | 48,8            | 4,92E+06          | 0,30                               | 6,69                             |
| 3     | 0,50             | 9,58E+06        | 47,0            | 6,53E+06          | 0,50                               | 6,81                             |
| 4     | 0,80             | 1,21E+07        | 45,6            | 8,46E+06          | 0,70                               | 6,93                             |
| 5     | 1,26             | 1,52E+07        | 44,0            | 1,09E+07          | 0,90                               | 7,04                             |
| 6     | 2,00             | 1,89E+07        | 42,5            | 1,40E+07          | 1,10                               | 7,14                             |
| 7     | 3,17             | 2,35E+07        | 41,0            | 1,77E+07          | 1,30                               | 7,25                             |
| 8     | 5,02             | 2,88E+07        | 39,6            | 2,22E+07          | 1,50                               | 7,35                             |
| 9     | 7,96             | 3,51E+07        | 38,3            | 2,75E+07          | 1,70                               | 7,44                             |
| 10    | 12,6             | 4,24E+07        | 36,9            | 3,39E+07          | 1,90                               | 7,53                             |
| 11    | 20,00            | 5,10E+07        | 35,4            | 4,16E+07          | 2,10                               | 7,62                             |
| 12    | 30,00            | 6,97E+07        | 34,3            | 4,93E+07          | 2,28                               | 7,69                             |

A partir dos resultados do ensaio de varredura de frequência, calcula-se o módulo de estocagem, para cada frequência. O cálculo para a primeira frequência ( $F = 0,20$  Hz) é apresentado abaixo. Os valores calculados para as demais frequências estão na Tabela B1.

$$G'(\omega) = |G^*|(\omega) \times \cos\delta(\omega)$$

$$G'(0,20) = (5,69 \times 10^6) \times \cos(50,6^\circ) = 3,61 \times 10^6 \text{ (Pa)}$$

Após calcular o módulo de estocagem, calcula-se o logaritmo de base 10 da frequência angular, para cada frequência. O cálculo para a primeira frequência ( $F = 0,20$  Hz) é apresentado abaixo. Os valores calculados para as demais frequências estão na Tabela B1.

$$\omega = 2\pi F$$

$$\text{Log}_{10}(\omega) = \text{Log}_{10}(2 \cdot \pi \cdot 0,20) = 0,10 \text{ (rad/s)}$$

Por último, calcula-se o logaritmo de base 10 do módulo de estocagem. O cálculo para a primeira frequência ( $F = 0,20$  Hz) é apresentado abaixo. Os valores calculados para as demais frequências estão na Tabela B1.

$$\text{Log}_{10}(G') = \text{Log}_{10}(3,61 \times 10^6) = 6,56 \text{ (Pa)}$$

Após efetuar os cálculos para todos os pontos, plota-se um gráfico com o logaritmo de base 10 da frequência angular no eixo horizontal e o logaritmo de base 10 do módulo de estocagem no eixo vertical e faz-se um ajuste linear dos dados, conforme a Figura B1:

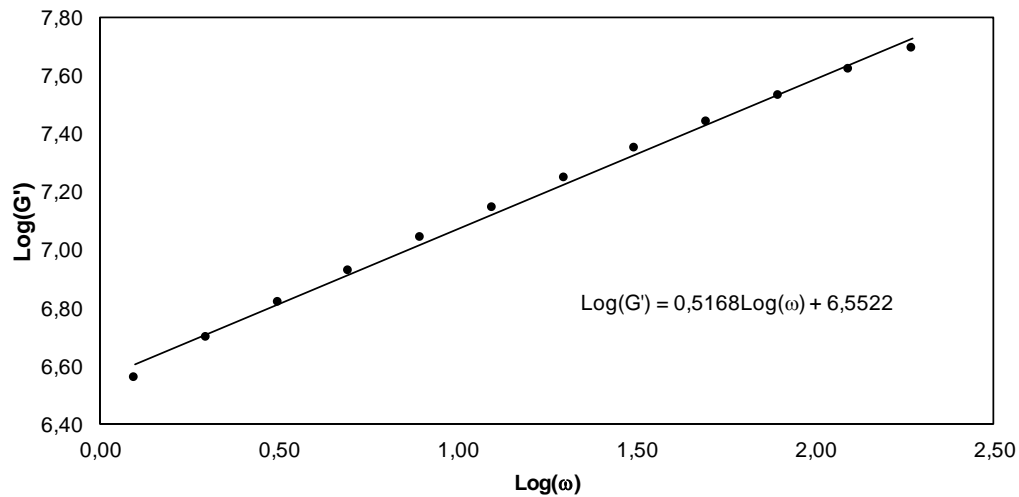


Figura B1 – Ajuste linear dos dados para o cálculo do parâmetro alfa

Os dados da figura anterior são ajustados pela seguinte equação:

$$\text{Log}(G') = m \times \text{Log}(\omega) + n$$

Pelo ajuste, tem-se o valor da inclinação (m) da reta de ajuste e calcula-se o parâmetro alfa pela seguinte equação:

$$\alpha = \frac{1}{m} = \frac{1}{0,5168} = 1,9350$$

#### Cálculo da curva característica de dano

Os resultados do ensaio de varredura de amplitude deste exemplo estão na Tabela B2, que contém apenas os dados até o ponto 75, terceiro ponto após o ponto de ruptura do ensaio (ponto 72). Os resultados completos estão nas Figuras A2, A3 e A4 do Anexo A.

A partir dos resultados do ensaio de varredura de amplitudes, define-se o módulo dinâmico de cisalhamento do ligante asfáltico não danificado (ponto 2) e calcula-se a integridade da amostra para cada ponto de dados (i). O cálculo para o ponto 1 é apresentado abaixo. A Tabela B3 apresenta os valores calculados até o ponto 75.

$$|G^*|_{inicial} = 3,825 \times 10^7$$

$$C_1 = \frac{|G^*|_1}{|G^*|_{inicial}} = \frac{3,867 \times 10^7}{3,825 \times 10^7} = 1,01$$

Como o ponto 2 é considerado o ponto inicial, é esperado que a integridade do ponto 1 seja maior que a integridade do ponto 2, pois os módulos devem decrescer durante o ensaio, como apresentado na Figura A3 do Anexo A.

Após calcular a integridade de todos os pontos, calcula-se o incremento de dano para cada ponto de dados (i). O cálculo para o ponto 3 é apresentado abaixo. A Tabela B3 apresenta os valores calculados até o ponto 75.

$$\Delta D_3 = [\pi \gamma_3^2 (C_2 - C_3)]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_3 - t_2)^{\frac{1}{1+\alpha}}$$

$$\Delta D_3 = [\pi \cdot 0,31^2 (1,0 - 0,992)]^{\frac{1,935}{1+1,935}} (5,98 - 3,81)^{\frac{1}{1+1,935}} = 0,049$$

Então, calcula-se o dano acumulado pela seguinte expressão:

$$C_3 < C_2, \text{ portanto } D_3 = D_2 + \Delta D_3 = 0,0 + 0,049 = 0,049$$

Como é considerado que o ponto 2 é o ponto inicial, neste ponto, o dano é igual a zero ( $D = 0$ ) e a integridade é igual a um ( $C = 1$ ). No ponto 1 não se calcula o dano, como indicado na Tabela B3.

**Tabela B2 – Dados do ensaio de varredura de amplitudes**

| Ponto | $ G^* $<br>(Pa) | Tensão<br>(Pa) | $\gamma$<br>(%) | $t$<br>(s) | $\delta$<br>(°) | Ponto | $ G^* $<br>(Pa) | Tensão<br>(Pa) | $\gamma$<br>(%) | $t$<br>(s) | $\delta$<br>(°) |
|-------|-----------------|----------------|-----------------|------------|-----------------|-------|-----------------|----------------|-----------------|------------|-----------------|
| 1     | 3,867E+07       | 3,8E+04        | 0,10            | 1,6        | 37,5            | 39    | 1,475E+07       | 1,2E+06        | 8,20            | 84,6       | 53,8            |
| 2     | 3,825E+07       | 1,2E+05        | 0,31            | 3,8        | 37,5            | 40    | 1,434E+07       | 1,2E+06        | 8,41            | 86,8       | 54,1            |
| 3     | 3,794E+07       | 2,0E+05        | 0,52            | 6,0        | 37,6            | 41    | 1,394E+07       | 1,2E+06        | 8,63            | 89,0       | 54,5            |
| 4     | 3,760E+07       | 2,7E+05        | 0,73            | 8,2        | 37,8            | 42    | 1,357E+07       | 1,2E+06        | 8,83            | 91,1       | 54,8            |
| 5     | 3,723E+07       | 3,5E+05        | 0,94            | 10,4       | 37,9            | 43    | 1,322E+07       | 1,2E+06        | 9,04            | 93,4       | 55,1            |
| 6     | 3,679E+07       | 4,2E+05        | 1,15            | 12,5       | 38,1            | 44    | 1,286E+07       | 1,2E+06        | 9,26            | 95,5       | 55,4            |
| 7     | 3,633E+07       | 5,0E+05        | 1,37            | 14,7       | 38,4            | 45    | 1,254E+07       | 1,2E+06        | 9,47            | 97,7       | 55,7            |
| 8     | 3,577E+07       | 5,6E+05        | 1,58            | 16,9       | 38,7            | 46    | 1,223E+07       | 1,2E+06        | 9,68            | 99,9       | 55,9            |
| 9     | 3,517E+07       | 6,3E+05        | 1,79            | 19,1       | 39,1            | 47    | 1,192E+07       | 1,2E+06        | 9,89            | 102,1      | 56,2            |
| 10    | 3,448E+07       | 6,9E+05        | 2,01            | 21,3       | 39,6            | 48    | 1,162E+07       | 1,2E+06        | 10,10           | 104,3      | 56,5            |
| 11    | 3,375E+07       | 7,5E+05        | 2,22            | 23,5       | 40,0            | 49    | 1,133E+07       | 1,2E+06        | 10,31           | 106,5      | 56,7            |
| 12    | 3,297E+07       | 8,0E+05        | 2,44            | 25,7       | 40,5            | 50    | 1,106E+07       | 1,2E+06        | 10,52           | 108,6      | 57,0            |
| 13    | 3,215E+07       | 8,5E+05        | 2,65            | 27,8       | 41,1            | 51    | 1,079E+07       | 1,2E+06        | 10,73           | 110,8      | 57,2            |
| 14    | 3,132E+07       | 9,0E+05        | 2,87            | 30,0       | 41,6            | 52    | 1,053E+07       | 1,2E+06        | 10,95           | 113,0      | 57,5            |
| 15    | 3,048E+07       | 9,4E+05        | 3,08            | 32,2       | 42,2            | 53    | 1,029E+07       | 1,1E+06        | 11,15           | 115,2      | 57,7            |
| 16    | 2,964E+07       | 9,8E+05        | 3,30            | 34,4       | 42,7            | 54    | 1,004E+07       | 1,1E+06        | 11,37           | 117,4      | 57,9            |
| 17    | 2,879E+07       | 1,0E+06        | 3,51            | 36,6       | 43,3            | 55    | 9,805E+06       | 1,1E+06        | 11,58           | 119,5      | 58,2            |
| 18    | 2,793E+07       | 1,0E+06        | 3,73            | 38,7       | 43,9            | 56    | 9,578E+06       | 1,1E+06        | 11,79           | 121,7      | 58,4            |
| 19    | 2,709E+07       | 1,1E+06        | 3,94            | 40,9       | 44,5            | 57    | 9,366E+06       | 1,1E+06        | 12,00           | 123,9      | 58,6            |
| 20    | 2,626E+07       | 1,1E+06        | 4,16            | 43,1       | 45,0            | 58    | 9,152E+06       | 1,1E+06        | 12,22           | 126,1      | 58,8            |
| 21    | 2,544E+07       | 1,1E+06        | 4,37            | 45,3       | 45,6            | 59    | 8,946E+06       | 1,1E+06        | 12,42           | 128,2      | 59,0            |
| 22    | 2,466E+07       | 1,1E+06        | 4,58            | 47,5       | 46,2            | 60    | 8,750E+06       | 1,1E+06        | 12,63           | 130,5      | 59,2            |
| 23    | 2,385E+07       | 1,1E+06        | 4,80            | 49,7       | 46,7            | 61    | 8,553E+06       | 1,1E+06        | 12,85           | 132,6      | 59,4            |
| 24    | 2,313E+07       | 1,2E+06        | 5,01            | 51,9       | 47,3            | 62    | 8,362E+06       | 1,1E+06        | 13,06           | 134,8      | 59,6            |
| 25    | 2,242E+07       | 1,2E+06        | 5,22            | 54,0       | 47,8            | 63    | 8,175E+06       | 1,1E+06        | 13,27           | 137,0      | 59,7            |
| 26    | 2,171E+07       | 1,2E+06        | 5,44            | 56,2       | 48,3            | 64    | 7,997E+06       | 1,1E+06        | 13,48           | 139,1      | 59,9            |
| 27    | 2,107E+07       | 1,2E+06        | 5,65            | 58,4       | 48,8            | 65    | 7,820E+06       | 1,1E+06        | 13,70           | 141,3      | 60,1            |
| 28    | 2,037E+07       | 1,2E+06        | 5,87            | 60,6       | 49,3            | 66    | 7,647E+06       | 1,1E+06        | 13,91           | 143,5      | 60,2            |
| 29    | 1,975E+07       | 1,2E+06        | 6,08            | 62,8       | 49,8            | 67    | 7,469E+06       | 1,1E+06        | 14,13           | 145,7      | 60,4            |
| 30    | 1,916E+07       | 1,2E+06        | 6,29            | 65,0       | 50,2            | 68    | 7,295E+06       | 1,0E+06        | 14,34           | 147,9      | 60,5            |
| 31    | 1,858E+07       | 1,2E+06        | 6,50            | 67,2       | 50,7            | 69    | 7,121E+06       | 1,0E+06        | 14,55           | 150,1      | 60,7            |
| 32    | 1,804E+07       | 1,2E+06        | 6,71            | 69,3       | 51,1            | 70    | 6,938E+06       | 1,0E+06        | 14,78           | 152,3      | 60,8            |
| 33    | 1,750E+07       | 1,2E+06        | 6,93            | 71,5       | 51,5            | 71    | 6,756E+06       | 1,0E+06        | 14,99           | 154,4      | 60,9            |
| 34    | 1,699E+07       | 1,2E+06        | 7,14            | 73,7       | 51,9            | 72    | 6,565E+06       | 1,0E+06        | 15,22           | 156,6      | 61,1            |
| 35    | 1,651E+07       | 1,2E+06        | 7,35            | 75,9       | 52,3            | 73    | 6,376E+06       | 9,8E+05        | 15,43           | 158,8      | 61,2            |
| 36    | 1,605E+07       | 1,2E+06        | 7,56            | 78,1       | 52,7            | 74    | 6,179E+06       | 9,7E+05        | 15,66           | 161,0      | 61,3            |
| 37    | 1,559E+07       | 1,2E+06        | 7,78            | 80,2       | 53,1            | 75    | 5,979E+06       | 9,5E+05        | 15,88           | 163,2      | 61,3            |
| 38    | 1,516E+07       | 1,2E+06        | 7,99            | 82,4       | 53,4            | 76    | ...             | ...            | ...             | ...        | ...             |

**Tabela B3 – Cálculos do ensaio de varredura de amplitudes (até o ponto 75)**

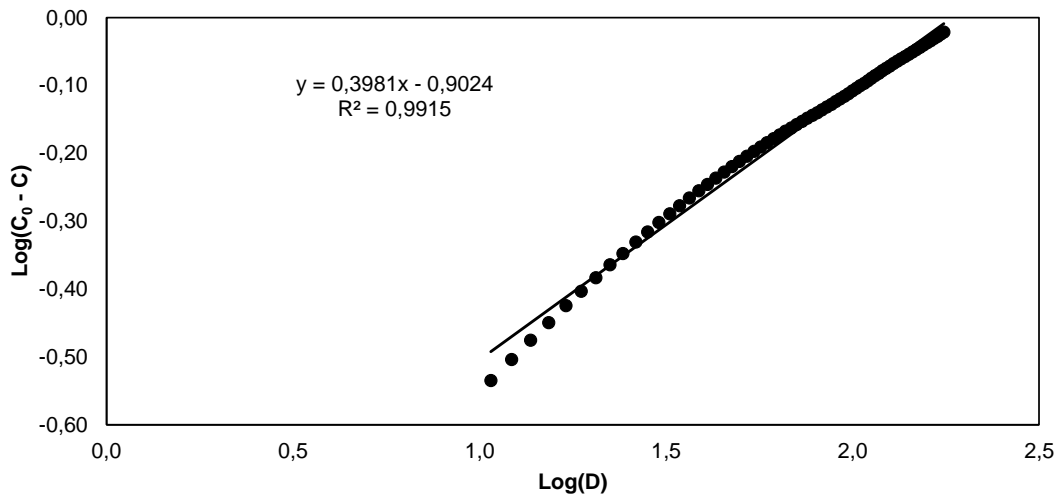
| Ponto | G' (Pa) | C    | D  | C    | γ <sup>R</sup> | ω <sup>R</sup> | Ponto | G' (Pa) | C    | D   | C    | γ <sup>R</sup> | ω <sup>R</sup> |
|-------|---------|------|----|------|----------------|----------------|-------|---------|------|-----|------|----------------|----------------|
| 1     | 2,4E+07 | 1,01 |    |      | 3,8E+04        | 7,3E+08        | 39    | 1,2E+07 | 0,39 | 50  | 0,42 | 3,1E+06        | 1,9E+12        |
| 2     | 2,3E+07 | 1,00 | 0  | 1,00 | 1,2E+05        | 7,0E+09        | 40    | 1,2E+07 | 0,37 | 52  | 0,41 | 3,2E+06        | 1,9E+12        |
| 3     | 2,3E+07 | 0,99 | 0  | 0,97 | 2,0E+05        | 2,0E+10        | 41    | 1,1E+07 | 0,36 | 54  | 0,39 | 3,3E+06        | 2,0E+12        |
| 4     | 2,3E+07 | 0,98 | 0  | 0,95 | 2,8E+05        | 3,8E+10        | 42    | 1,1E+07 | 0,35 | 57  | 0,38 | 3,4E+06        | 2,0E+12        |
| 5     | 2,3E+07 | 0,97 | 0  | 0,94 | 3,6E+05        | 6,3E+10        | 43    | 1,1E+07 | 0,35 | 59  | 0,37 | 3,5E+06        | 2,1E+12        |
| 6     | 2,3E+07 | 0,96 | 0  | 0,92 | 4,4E+05        | 9,4E+10        | 44    | 1,1E+07 | 0,34 | 61  | 0,36 | 3,5E+06        | 2,1E+12        |
| 7     | 2,3E+07 | 0,95 | 1  | 0,90 | 5,2E+05        | 1,3E+11        | 45    | 1,0E+07 | 0,33 | 64  | 0,35 | 3,6E+06        | 2,1E+12        |
| 8     | 2,3E+07 | 0,94 | 1  | 0,89 | 6,0E+05        | 1,7E+11        | 46    | 1,0E+07 | 0,32 | 66  | 0,34 | 3,7E+06        | 2,2E+12        |
| 9     | 2,2E+07 | 0,92 | 1  | 0,87 | 6,9E+05        | 2,2E+11        | 47    | 9,9E+06 | 0,31 | 68  | 0,33 | 3,8E+06        | 2,2E+12        |
| 10    | 2,2E+07 | 0,90 | 2  | 0,85 | 7,7E+05        | 2,7E+11        | 48    | 9,7E+06 | 0,30 | 71  | 0,32 | 3,9E+06        | 2,3E+12        |
| 11    | 2,2E+07 | 0,88 | 2  | 0,84 | 8,5E+05        | 3,2E+11        | 49    | 9,5E+06 | 0,30 | 73  | 0,31 | 3,9E+06        | 2,3E+12        |
| 12    | 2,2E+07 | 0,86 | 3  | 0,82 | 9,3E+05        | 3,7E+11        | 50    | 9,3E+06 | 0,29 | 76  | 0,31 | 4,0E+06        | 2,3E+12        |
| 13    | 2,1E+07 | 0,84 | 4  | 0,80 | 1,0E+06        | 4,3E+11        | 51    | 9,1E+06 | 0,28 | 78  | 0,30 | 4,1E+06        | 2,4E+12        |
| 14    | 2,1E+07 | 0,82 | 5  | 0,78 | 1,1E+06        | 4,9E+11        | 52    | 8,9E+06 | 0,28 | 80  | 0,29 | 4,2E+06        | 2,4E+12        |
| 15    | 2,1E+07 | 0,80 | 6  | 0,76 | 1,2E+06        | 5,5E+11        | 53    | 8,7E+06 | 0,27 | 83  | 0,28 | 4,3E+06        | 2,4E+12        |
| 16    | 2,0E+07 | 0,78 | 7  | 0,75 | 1,3E+06        | 6,2E+11        | 54    | 8,5E+06 | 0,26 | 85  | 0,27 | 4,4E+06        | 2,5E+12        |
| 17    | 2,0E+07 | 0,75 | 8  | 0,73 | 1,3E+06        | 6,8E+11        | 55    | 8,3E+06 | 0,26 | 88  | 0,26 | 4,4E+06        | 2,5E+12        |
| 18    | 2,0E+07 | 0,73 | 9  | 0,71 | 1,4E+06        | 7,4E+11        | 56    | 8,2E+06 | 0,25 | 90  | 0,25 | 4,5E+06        | 2,5E+12        |
| 19    | 1,9E+07 | 0,71 | 11 | 0,69 | 1,5E+06        | 8,1E+11        | 57    | 8,0E+06 | 0,24 | 92  | 0,24 | 4,6E+06        | 2,6E+12        |
| 20    | 1,9E+07 | 0,69 | 12 | 0,68 | 1,6E+06        | 8,7E+11        | 58    | 7,8E+06 | 0,24 | 95  | 0,24 | 4,7E+06        | 2,6E+12        |
| 21    | 1,8E+07 | 0,67 | 14 | 0,66 | 1,7E+06        | 9,3E+11        | 59    | 7,7E+06 | 0,23 | 97  | 0,23 | 4,8E+06        | 2,6E+12        |
| 22    | 1,8E+07 | 0,64 | 15 | 0,64 | 1,8E+06        | 9,9E+11        | 60    | 7,5E+06 | 0,23 | 100 | 0,22 | 4,8E+06        | 2,7E+12        |
| 23    | 1,8E+07 | 0,62 | 17 | 0,63 | 1,8E+06        | 1,1E+12        | 61    | 7,4E+06 | 0,22 | 102 | 0,21 | 4,9E+06        | 2,7E+12        |
| 24    | 1,7E+07 | 0,60 | 19 | 0,61 | 1,9E+06        | 1,1E+12        | 62    | 7,2E+06 | 0,22 | 105 | 0,20 | 5,0E+06        | 2,7E+12        |
| 25    | 1,7E+07 | 0,59 | 20 | 0,60 | 2,0E+06        | 1,2E+12        | 63    | 7,1E+06 | 0,21 | 107 | 0,20 | 5,1E+06        | 2,8E+12        |
| 26    | 1,6E+07 | 0,57 | 22 | 0,58 | 2,1E+06        | 1,2E+12        | 64    | 6,9E+06 | 0,21 | 110 | 0,19 | 5,2E+06        | 2,8E+12        |
| 27    | 1,6E+07 | 0,55 | 24 | 0,57 | 2,2E+06        | 1,3E+12        | 65    | 6,8E+06 | 0,20 | 112 | 0,18 | 5,2E+06        | 2,8E+12        |
| 28    | 1,6E+07 | 0,53 | 26 | 0,55 | 2,2E+06        | 1,3E+12        | 66    | 6,6E+06 | 0,20 | 115 | 0,17 | 5,3E+06        | 2,8E+12        |
| 29    | 1,5E+07 | 0,52 | 28 | 0,54 | 2,3E+06        | 1,4E+12        | 67    | 6,5E+06 | 0,20 | 118 | 0,16 | 5,4E+06        | 2,8E+12        |
| 30    | 1,5E+07 | 0,50 | 30 | 0,53 | 2,4E+06        | 1,5E+12        | 68    | 6,4E+06 | 0,19 | 120 | 0,16 | 5,5E+06        | 2,9E+12        |
| 31    | 1,4E+07 | 0,49 | 32 | 0,51 | 2,5E+06        | 1,5E+12        | 69    | 6,2E+06 | 0,19 | 123 | 0,15 | 5,6E+06        | 2,9E+12        |
| 32    | 1,4E+07 | 0,47 | 34 | 0,50 | 2,6E+06        | 1,6E+12        | 70    | 6,1E+06 | 0,18 | 126 | 0,14 | 5,7E+06        | 2,9E+12        |
| 33    | 1,4E+07 | 0,46 | 37 | 0,49 | 2,7E+06        | 1,6E+12        | 71    | 5,9E+06 | 0,18 | 129 | 0,13 | 5,7E+06        | 2,9E+12        |
| 34    | 1,3E+07 | 0,44 | 39 | 0,48 | 2,7E+06        | 1,7E+12        | 72    | 5,8E+06 | 0,17 | 132 | 0,12 | 5,8E+06        | 2,9E+12        |
| 35    | 1,3E+07 | 0,43 | 41 | 0,46 | 2,8E+06        | 1,7E+12        | 73    | 5,6E+06 | 0,17 | 135 | 0,12 | 5,9E+06        | 2,9E+12        |
| 36    | 1,3E+07 | 0,42 | 43 | 0,45 | 2,9E+06        | 1,8E+12        | 74    | 5,4E+06 | 0,16 | 138 | 0,11 | 6,0E+06        | 2,9E+12        |
| 37    | 1,3E+07 | 0,41 | 45 | 0,44 | 3,0E+06        | 1,8E+12        | 75    | 5,3E+06 | 0,16 | 141 | 0,10 | 6,1E+06        | 2,9E+12        |
| 38    | 1,2E+07 | 0,40 | 47 | 0,43 | 3,1E+06        | 1,8E+12        | 76    | ...     |      |     |      |                |                |

Após calcular a integridade (C) e o dano (D) para todos os pontos, plota-se a curva C(t) versus D(t), com a integridade no eixo vertical e o dano no eixo horizontal, e faz-se o ajuste da curva utilizando a equação abaixo:

$$C(t) = C_0 - C_1(D(t))^{C_2}$$

Os coeficientes de regressão podem ser calculados a partir da linearização da equação anterior, conforme apresentado na equação abaixo e ilustrado na Figura B2:

$$\log(C_0 - C(t)) = \log(C_1) + C_2 \log(D)$$



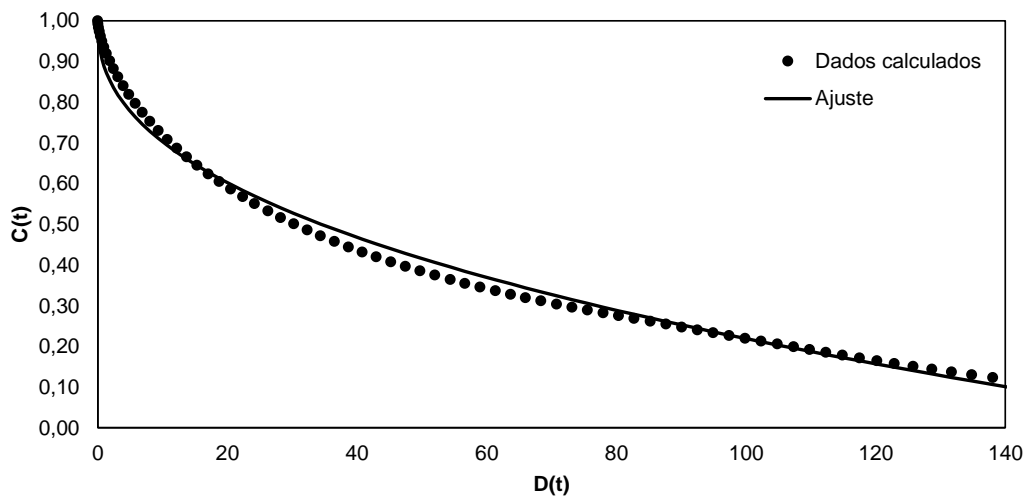
**Figura B2 – Linearização dos dados da curva C(t) versus D(t)**

Para a linearização anterior foram descartados os pontos com  $D < 10$ . Com isso, o coeficiente  $C_1$  é igual ao inverso do logaritmo do intercepto e  $C_2$  é igual à inclinação da linha de ajuste formada, plotando os valores de  $Log(C_0 - C)$  versus  $Log(D)$ . A Figura B3 apresenta a curva característica de dano ajustada do exemplo. Para o ajuste desta curva, os coeficientes  $C_0$ ,  $C_1$  e  $C_2$  obtidos foram:

$$C_0 = 1,0$$

$$C_1 = 0,1136$$

$$C_2 = 0,4187$$



**Figura B3 – Curva característica de dano**

Como a teoria S-VECD não deve ser aplicada após a ruptura do material, o ajuste da curva  $C(t)$  versus  $D(t)$  deve ser feito utilizando apenas os dados até o ponto de ruptura.

Após ajustar a curva  $C(t)$  versus  $D(t)$ , define-se o ponto de ruptura do ensaio. Para isso, é necessário calcular a pseudodeformação para cada ponto de dados ( $i$ ). O cálculo para o ponto 3 é apresentado abaixo. A Tabela B3 apresenta os valores calculados até o ponto 75.

$$\gamma_3^R = \frac{\gamma_3}{100} \times |G^*|_{inicial}$$

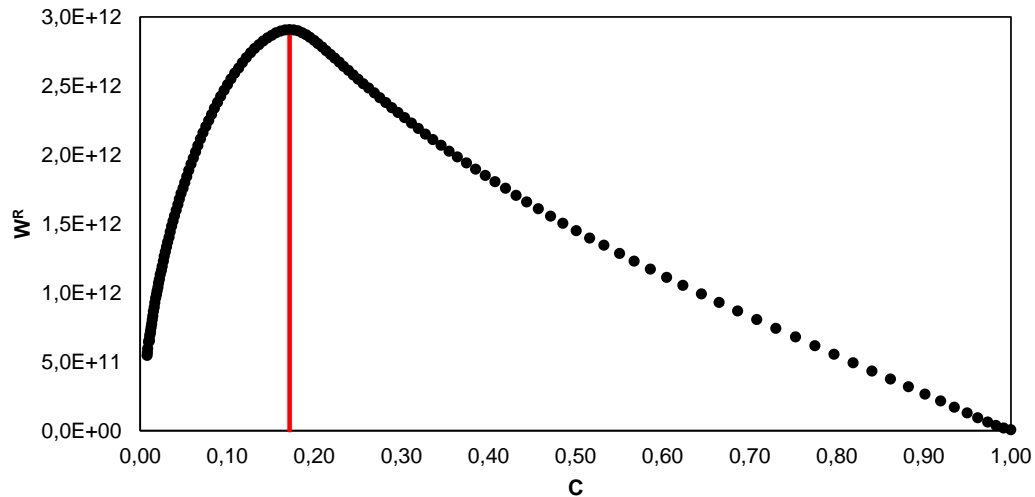
$$\gamma_3^R = \frac{0,52}{100} \times 3,825 \times 10^7 = 1,988 \times 10^5 \text{ (Pa)}$$

Após calcular as pseudodeformações para todos os pontos, calcula-se a pseudoenergia de deformação para cada ponto de dados ( $i$ ). O cálculo para o ponto 3 é apresentado abaixo. A Tabela B3 apresenta os valores calculados até o ponto 75.

$$W_3^R = 0,5 \times C_3 \times (\gamma_3^R)^2$$

$$W_3^R = 0,5 \times 0,99 \times (1,988 \times 10^5)^2 = 1,961 \times 10^{10} \text{ (Pa}^2\text{)}$$

Após calcular a pseudoenergia de deformação para todos os pontos, identifica-se o ponto em que ocorre a ruptura do ensaio, que corresponde ao ponto de máxima pseudoenergia de deformação. A Figura B4 apresenta a variação da pseudoenergia de deformação em função da integridade da amostra, indicando o ponto de ruptura. Para o ensaio deste exemplo, a ruptura ocorreu no ponto 72, destacado em amarelo na Tabela B3. O valor máximo de  $W_R$  foi  $2,907 \times 10^{12}$  (Pa<sup>2</sup>).



**Figura B4 – Variação da pseudoenergia de deformação para identificação da ruptura**

Após identificar o ponto de ruptura, identifica-se a integridade no ponto de ruptura ( $C_f = 0,1717$ ) e calcula-se o dano teórico na ruptura, como segue:

$$D_f = \left( \frac{C_0 - C_f}{C_1} \right)^{1/c_2}$$

$$D_f = \left( \frac{1,0 - 0,1717}{0,1136} \right)^{1/0,4187} = 115,1$$

Após calcular o dano na ruptura, calculam-se os coeficientes da curva de fadiga do ligante asfáltico, como segue:

$$k = 1 + (1 + C_2)\alpha = 1 + (1 + 0,4187)1,9350 = 2,1246$$

$$A = \frac{F \cdot (D_f)^k}{k \cdot (\pi \cdot C_1 \cdot C_2)^\alpha} = \frac{10 \cdot (115,1)^{2,1246}}{2,1246(\pi \times 0,1136 \times 0,1717)^{1,935}} = 4,4630 \times 10^6$$

$$B = -2\alpha = -3,8700$$

Com os coeficientes  $A$  e  $B$ , determina-se a curva de fadiga do ligante, que relaciona o número de ciclos até a ruptura ( $N_f$ ) com a deformação de cisalhamento aplicada. A curva de fadiga é apresentada na Figura B5.

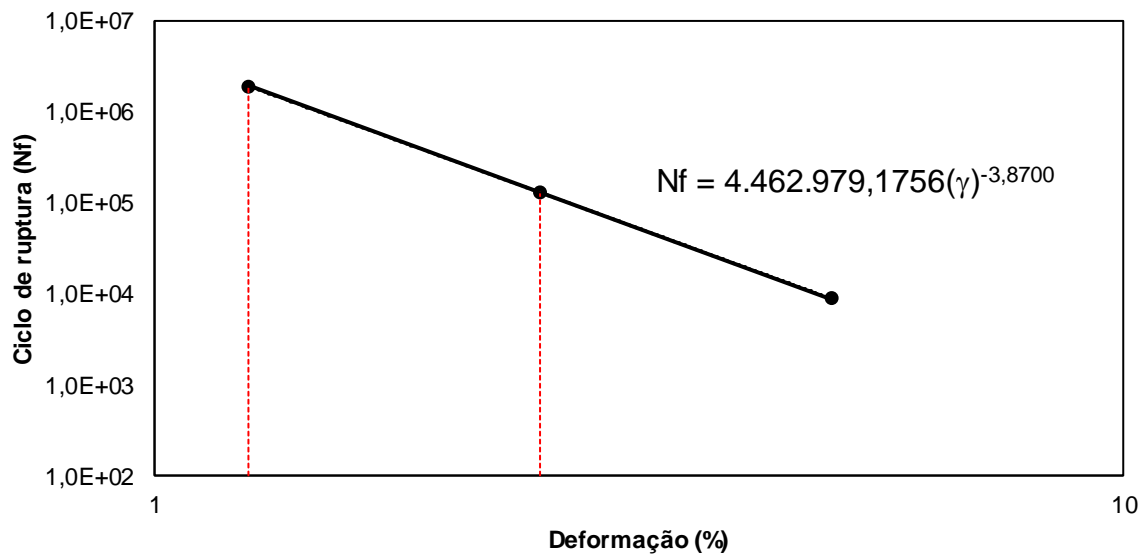


Figura B5 – Curva de fadiga do ligante asfáltico

Por último, calcula-se o *FFL*, que representa a área abaixo da curva de fadiga, entre as deformações de 1,25 % e 2,50 %, conforme indicado na Figura B5 pelas linhas vermelhas tracejadas.

O *FFL* é calculado como segue:

$$FFL = \frac{\text{Log}(N_{f1,25} \times N_{f2,5})}{2} \times \text{Log}\left(\frac{0,0250}{0,0125}\right)$$

$$FFL = \frac{\text{Log}(1,882 \times 10^6 \times 1,287 \times 10^5)}{2} \times \text{Log}\left(\frac{0,0250}{0,0125}\right) = 1,7135$$



### Anexo C (Informativo) – Bibliografia

- a) AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO TP 101 – Standard Method of Test for Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep.
- b) \_\_\_\_\_. AASHTO T 391-20 – Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep.
- c) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D6373-16 – Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder.
- d) HINTZ, Cassie. Understanding Mechanisms Leading to Asphalt Binder Fatigue. Ph.D. dissertation, University of Wisconsin, Madison, WI, 2012.
- e) HINTZ, C.; BAHIA, H. Understanding mechanisms leading to asphalt binder fatigue in the dynamic shear rheometer. In: Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 82, pp. 465-501, 2013.
- f) HINTZ, C.; VELASQUEZ R.; JOHNSON, C.; BAHIA, H. Modification and validation of the linear amplitude sweep test for binder fatigue specification. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2207, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 99–106, 2011.
- g) KIM, Y.; LEE, H.J.; LITTLE, D. N.; KIM, Y. R.; GIBSON, N.; KING, G.; PELLINEN, T.; FEE, F. A simple testing method to evaluate fatigue fracture and damage performance of asphalt mixtures. Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions, 75, 755-788.
- h) MARTINS, A. T. Contribuição para a validação do ensaio de resistência ao dano por fadiga para ligantes asfálticos. Dissertação (mestrado) – UFRJ / COPPE / PEC, Rio de Janeiro, 2014.
- i) NASCIMENTO, L. A. H. Implementation and validation of the viscoelastic continuum damage theory for asphalt mixture and pavement analysis in Brazil. Ph.D. dissertation, North Carolina State University, North Carolina, EUA, 2015.
- j) OSMARI, P. H. Characterization of the fatigue damage behavior of asphaltic materials based on experimental multiscale approaches and on the S-VECD theory. Tese (doutorado) – UFRJ / COPPE / PEC, Rio de Janeiro, 2021.
- k) PARK, S. W.; SCHAPERLY, R. A. A viscoelastic constitutive model for particulate composites with growing damage. International Journal of Solids and Structures, Vol. 34, n. 8, pp. 931–947, 1997.
- l) SCHAPERLY, R. A. A theory of crack initiation and growth in viscoelastic media. International Journal of Fracture, Vol. 11, n. 3, pp. 141-159, 1975.
- m) UNDERWOOD, B. S. Multiscale constitutive modeling of asphalt concrete. Tese (Doutorado), North Carolina State University, North Carolina, 2011.
- n) ZEIADA, W.; LIU, H.; EZZAT, H.; AL-KHATEEB G. G.; UNDERWOOD B. S.; SHANABLEH A.; SAMARAI M. Review of Superpave performance grading system and recent developments in the performance-based test methods for asphalt binder characterization. Construction and Building Materials, Vol. 319, 2022.
- o) ZHANG H.; SHEN K.; XU G.; TONG J.; WANG R.; CAI D.; CHEN X. Fatigue resistance of aged asphalt binders: An investigation of different analytical methods in linear amplitude sweep test. Construction and Building Materials, Vol. 241, 2020.

## Índice Geral

|  |           |   |            |
|--|-----------|---|------------|
| Abstract.....  | 1         | Figura B1 - Ajuste linear dos dados para o cálculo do parâmetro alfa. ....              | 11         |
| Amostra .....  | 3         | Figura B2 – Linearização dos dados da curva C(t) versus D(t) .....                      | 14         |
| Anexo A (Informativo) – Exemplos de gráficos do ensaio LAS .....                                   | 8         | Figura B3 - Curva característica de dano. ....  | 14         |
| Anexo B - Exemplo de cálculo e interpretação do ensaio LAS. ....                                   | 10        | Figura B4 - Variação da pseudoenergia de deformação para identificação da ruptura. .... | 15         |
| Anexo C (Informativo) - Bibliografia .....   | 17        | Figura B5 - Curva de fadiga do ligante asfáltico. ....                                  | 16         |
| Ângulo de fase ( $\delta$ ) .....  | 3.5.....2 | Índice geral.....   | 18         |
| Cálculo da curva característica de dano .....  | 7.2.....4 | Materiais viscoelásticos.....   | 3.2.....2  |
| Cálculo da curva de fadiga .....   | 7.4.....6 | Módulo dinâmico de cisalhamento ( $ G^* $ ), .....                                      | 3.4.....2  |
| Cálculo do Fator de Fadiga .....   | 7.5.....7 | Objetivo .....  | 2          |
| Cálculo do parâmetro alfa .....  | 7.1.....4 | Parâmetro Alpha ( $\alpha$ ).....   | 3.7.....2  |
| Cálculo e interpretação dos resultados .....   | 4         | Prefácio .....  | 2          |
| Carregamento oscilatório .....   | 3.3.....2 | Preparação da amostra .....   | 6.1.....3  |
| Critério de ruptura .....  | 7.3.....6 | Pseudodeformação ( $\gamma_R$ ).....  | 3.8.....3  |
| Dano Contínuo Viscoelástico - Viscoelastic Continuum Damage (VECD) .....                           | 3.6.....3 | Referências normativas.....   | 2          |
| Dano Contínuo Viscoelástico Simplificado - Simplified Viscoelastic Continuum Damage (S-VECD) ..... | 3.9.....3 | Regime viscoelástico linear .....   | 3.3.....2  |
| Definições .....   | 2         | Relatório .....   | 7          |
| Ensaio .....   | 3         | Reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR - Dynamic Shear Rheometer).....                  | 4.2..... 3 |
| Equipamentos .....   | 3         | Resumo .....  | 1          |
| Estufa de Filme Fino Rotativo (RTFOT) .....  | 4.1.....3 | Sumário .....   | 1          |
| Figura A1 - Exemplo de resultados do ensaio de varredura de frequências. ....                      | 8         | Tabela B1 - Dados e cálculos do ensaio de varredura de frequências.....                 | 10         |
| Figura A2 - Esquema de carregamento para o ensaio de varredura de amplitudes. ....                 | 8         | Tabela B2 – Dados do ensaio de varredura de amplitudes .....                            | 12         |
| Figura A3 - Exemplo de resultados do ensaio de varredura de amplitudes. ....                       | 9         | Tabela B3 – Cálculos do ensaio de varredura de amplitudes (até o ponto 75).....         | 13         |
| Figura A4 - Exemplo de curva tensão-deformação do ensaio de varredura de amplitudes. ....          | 9         | Varredura de amplitude .....  | 6.3.....4  |
|  |           | Varredura de frequência.....  | 6.2.....3  |