



MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA  
DEPARTAMENTO NACIONAL DE  
INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

DIRETORIA GERAL

DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E  
PESQUISA

INSTITUTO DE PESQUISAS  
RODOVIÁRIAS

Rodovia Presidente Dutra, km 163  
Centro Rodoviário – Vigário Geral  
Rio de Janeiro/RJ – CEP: 21240-000  
E-mail: ipr@dnit.gov.br

Setembro/2019

NORMA DNIT 416/2019 - ME

## Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio

**Autor:** Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR

**Processo:** 50600.016704/2019-21.

**Aprovação pela Diretoria Colegiada do DNIT na Reunião de 02 /09/2019.**

*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:

Mistura asfáltica, módulo dinâmico, reologia, curva mestra, ângulo de fase

### Total de páginas

19

### Resumo

Esta Norma descreve um procedimento de ensaio para determinação do módulo dinâmico e do ângulo de fase de misturas asfálticas, em uma série de temperaturas e frequências de carregamento. Aplicável a corpo de prova moldado em laboratório, de mistura asfáltica com tamanho máximo nominal do agregado de até 25 mm.

### Abstract

This Standard describes a test procedure for determining the dynamic modulus and phase angle of asphalt mixtures in a series of temperatures and loading frequencies. This standard is applicable to a laboratory molded asphalt mix specimen with a nominal maximum aggregate size of 25 mm, maximum.

### Sumário

Prefácio.....	1
1 Objetivo.....	1
2 Referência normativa .....	2
3 Definições.....	2
4 Aparelhagem.....	2
5 Calibração dos equipamentos.....	3
6 Preparação do corpo de prova.....	4
7 Instrumentação do corpo de prova.....	5
8 Ensaio .....	5

9 Resultados.....	6
10 Qualidade dos dados.....	9
11 Curva mestra.....	9
12 Relatório .....	10
Anexo A (Normativo).....	13
Anexo B (Normativo) .....	15
Anexo C (Informativo) .....	17
Anexo D (Informativo) Bibliografia.....	18
Índice geral.....	19

### Prefácio

A presente Norma foi preparada pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR/DPP, para servir como documento base, visando estabelecer os procedimentos para determinação do módulo dinâmico e do ângulo de fase de misturas asfálticas. A criação desta norma procede dos estudos e pesquisas realizados no âmbito do Termo de Execução Descentralizada – TED nº 682/2014 firmado com a 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

Este método consiste na aplicação de cargas axiais de compressão do tipo senoidal (*haversine*) a corpo de

prova de mistura asfáltica de formato cilíndrico, em determinadas temperaturas e frequências de carregamento. A tensão aplicada e a deformação axial recuperável medida são usadas para calcular o módulo dinâmico e o ângulo de fase. Os valores de módulo dinâmico medidos em uma série de temperaturas e frequências de carregamento são ajustados numa curva mestra que caracteriza a mistura asfáltica para uso no dimensionamento de pavimentos e como critério de desempenho para a dosagem de misturas asfálticas.

## 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) DNIT 178-PRO: Pavimentação Asfáltica - Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o Compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento. Rio de Janeiro: IPR.

b) DNIT 415-ME: Pavimentação – Mistura asfáltica – Teor de vazios de agregados miúdos não compactados – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR.

## 3 Definições

### 3.1 Módulo complexo ( $E^*$ )

É o número complexo que define a relação entre tensão e deformação para um material viscoelástico linear.

### 3.2 Módulo dinâmico ( $|E^*|$ )

É o valor absoluto do módulo complexo, calculado pela razão entre a amplitude de tensão (pico a pico) e a amplitude de deformação axial (pico a pico), para um material sob o carregamento de compressão do tipo senoidal (haversine).

### 3.3 Ângulo de fase ( $\varphi$ )

É um parâmetro que representa a defasagem entre a tensão e a deformação, expressa em graus ou radianos, obtida pela multiplicação do tempo pela frequência angular. A diferença de tempo é multiplicada pela frequência angular do carregamento cíclico, em radianos por segundo, para a determinação do ângulo

de fase, em radianos. O resultado pode ser multiplicado por  $180^\circ/\pi$  para o ângulo ser dado em graus. O ângulo de  $0^\circ$  representa o comportamento de um sólido perfeitamente elástico e o ângulo de  $90^\circ$  o de um fluido perfeitamente viscoso. Ver esquema da Figura A1, Anexo A.

## 3.4 Curva mestra de módulo dinâmico

É uma expressão matemática utilizada para sintetizar o comportamento viscoelástico de uma mistura asfáltica, sob as várias condições de tempo de carregamento e de temperatura, a partir dos valores de propriedades como o módulo dinâmico, obtidas em laboratório. A curva mestra do módulo dinâmico pode ser usada para avaliação e caracterização de misturas asfálticas para o dimensionamento de pavimentos em métodos mecanístico-empíricos.

## 4 Aparelhagem

Os equipamentos essenciais deste método de ensaio são: prensa, câmara de temperatura e sistema de aquisição de dados. As Figuras A2, A3 e A4 do Anexo A mostram alguns detalhes do corpo de prova no ensaio.

### 4.1 Prensa

Equipamento servo-hidráulico capaz de aplicar frequências de carregamento de compressão do tipo *haversine*, variando de 0,1 a 25 Hz, e níveis de carga de até 25 kN. O erro padrão para a carga aplicada deve ser inferior a 5 %. O erro padrão da carga aplicada é medido pela diferença entre a carga medida e a curva senoidal de melhor ajuste, conforme definido na equação 1.

$$se(P) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n-4}} \left( \frac{100\%}{\hat{x}_0} \right) \quad (1)$$

Onde:

$se(P)$  = erro padrão da carga aplicada;

$x_i$  = carga medida no ponto  $i$ ;

$\hat{x}_i$  = previsão da carga no ponto  $i$  do ajuste;

$n$  = número total de pontos de dados coletados;

$\hat{x}_0$  = amplitude medida no ajuste.

#### 4.2 Câmara de temperatura

Permite condicionar o corpo de prova para o ensaio na temperatura desejada, capaz de controlar a temperatura no intervalo de -10 °C a 60 °C, com precisão de  $\pm 0,5$  °C, medida no interior de um corpo de prova de controle. Deve ser larga suficiente para acomodar, no mínimo, o corpo de prova do ensaio e o de controle que tem um ou dois sensores de temperatura instalados no centro para a verificação da temperatura interna.

#### 4.3 Sistema de aquisição de dados

Capaz de medir e armazenar o histórico de tempo de carregamento aplicado, as tensões e as deformações axiais, o período do carregamento do tipo *haversine* aplicado e as deformações resultantes com resolução de 0,5 %, com as características mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Resolução e Acurácia do Sistema de Aquisição de Dados

Medição	Varição	Acurácia	Resolução
Carregamento	0,10 a 25 kN	Erro $\leq 0,1$ %	$\leq 0,001$ kN
Deslocamento do êmbolo	$\geq 1$ mm	Erro $\leq 0,002$ mm	$\leq 0,002$ mm
Ângulo de fase	Não especificado	$\leq 1$ grau	Não especificado

#### 4.4 Célula de carga eletrônica

A carga deve ser medida por meio de célula de carga eletrônica, calibrada, colocada preferencialmente sob o corpo de prova. O sistema de medição da carga deve ter um intervalo mínimo de 0,10 a 25 kN, com resolução de 1,2 N.

#### 4.5 Transdutor de deslocamento eletrônico

A medição das deformações axiais deve ser efetuada com transdutores de deslocamento eletrônicos (LVDT ou extensômetro), montados diretamente na parte central da superfície lateral do corpo de prova, com comprimento de medida de  $100 \pm 2$  mm, acoplados de acordo com seus sistemas de fixação, conforme Figuras A2 e A3 do Anexo A. As deformações podem ser medidas com dois transdutores fixados em posições diametralmente opostas, ou três transdutores fixados a

cada 120°, ou quatro transdutores fixados a cada 90°. Os transdutores de deslocamento axiais devem ter resolução mínima de 0,01 mm.

#### 4.6 Discos superior e inferior

São discos instalados acima e abaixo do corpo de prova, para que ocorra a transferência de carregamento entre a máquina e o corpo de prova. Estes discos podem ser de material rígido, aço niquelado ou alumínio anodizado de alta resistência. A face de cada disco deve ser perfeitamente plana para que ocorra o total contato com o corpo de prova, a fim de transferir a carga uniformemente.

#### 4.7 Membranas redutoras de atrito

Devem ser colocadas entre as extremidades do corpo de prova e os discos superior e inferior, para reduzir o atrito existente entre as áreas de contato. Cada membrana pode ser composta de duas folhas de Teflon® ou duas películas de látex de no máximo 0,5 mm de espessura, justapostas e separadas por graxa de silicone.

#### 4.8 Compactador giratório

Compactador giratório e equipamentos associados para preparação do corpo de prova em laboratório de acordo com a norma DNIT 178/2018 – PRO. O compactador deve ser capaz de compactar corpo de prova com 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura.

### 5 Calibração dos Equipamentos

**5.1** O condicionamento do sinal e o sistema de aquisição de dados devem ser verificados, para garantir que não haja excesso de defasagem eletrônica entre os canais de carga e deslocamento.

Adverte-se para que o ensaio de módulo dinâmico seja realizado a 20 °C em um material elástico, como o alumínio, para que possa ser verificada a defasagem eletrônica nula. Caso isso não ocorra, a defasagem deve ser corrigida no cálculo do ângulo de fase. Isso pode ocorrer devido a interferências nos sinais, originando uma fase elétrica. O corpo de prova elástico deve ter as mesmas dimensões dos corpos de prova de mistura asfáltica (Tabela 2) e o ensaio deve ser

realizado nas mesmas condições, com cargas que ocasionem deformações cíclicas axiais de pelo menos 30 micra. Em cada frequência de ensaio, calcular o ângulo de fase conforme seção 9. Se em uma determinada frequência o ângulo de fase encontrado para o material elástico for maior do que  $0,5^\circ$  ou menor do que  $-0,5^\circ$ , então tais valores devem ser utilizados para corrigir os ângulos de fase medidos nas misturas asfálticas nas respectivas frequências. Para tal, simplesmente diminui-se do ângulo de fase medido na mistura asfáltica o valor encontrado no corpo de prova elástico na respectiva frequência.

**5.2** O sistema completo de ensaio (prensa e acessórios) deve ser calibrado antes do primeiro uso, e, pelo menos, uma vez ao ano ou conforme indicações do fabricante, ou a cada 200 ensaios. Deve ser verificada a calibração de todos os componentes de medição do sistema de ensaio, como as células de carga e os dispositivos de medição de deslocamentos.

**5.3** Verificar a capacidade da câmara de temperatura de manter a temperatura na acurácia especificada na seção 4.2. Caso qualquer verificação aponte dados fora da acurácia especificada, o problema deve ser corrigido antes de iniciar o ensaio.

## **6 Preparação do corpo de prova**

### **6.1 Tamanho**

O corpo de prova deve ser preparado de acordo com a norma DNIT 178/2018 – PRO. Recomenda-se que o corpo de prova tenha um grau de compactação de  $98,5 \pm 0,5$  % da densidade aparente de projeto da mistura compactada (aproximadamente 5,5 % de vazios para misturas dosadas para 4 % de vazios, como exemplo). A altura do corpo de prova deve ser de  $150,0 \pm 2,5$  mm e o diâmetro deve ser de  $100 \pm 2,0$  mm.

### **6.2 Envelhecimento**

Misturas soltas preparadas em laboratório devem ser condicionadas por 2 horas na temperatura de compactação. Misturas não compactadas amostradas em campo não devem ser envelhecidas antes do ensaio, somente ser reaquecidas, ficando o tempo mínimo necessário na estufa.

### **6.3 Armazenamento**

O corpo de prova deve ser armazenado por no mínimo 16 horas após a sua compactação, antes de ser posicionado dentro da câmara de temperatura. Se não puder ser ensaiado em no máximo dois dias após a sua fabricação, deve ser envolto em polietileno, ou guardado em um saco de polietileno, e estocado em um ambiente sem luz, sob temperatura entre 5 e 25 °C. Os corpos de prova não podem ser empilhados durante o armazenamento e devem ser mantidos na posição vertical sobre superfície perfeitamente plana.

NOTA: Indica-se que os corpos de prova fiquem armazenados por, no máximo, duas semanas, para minimizar o efeito do envelhecimento nos resultados.

### **6.4 Diâmetro**

Com um paquímetro, medir o diâmetro do corpo de prova em duas direções, espaçadas em  $90^\circ$ , no centro e nos dois terços médios ao longo de sua geratriz. Anotar as seis medidas de diâmetro com precisão de 0,1 mm. Calcular a média e o desvio-padrão das seis medidas e rejeitar o corpo de prova que não atender aos requisitos da Tabela 2 da subseção 6.7, desta norma.

### **6.5 Altura**

Com um paquímetro, medir a altura do corpo de prova em quatro pontos, a cada  $90^\circ$ . Anotar as quatro medidas com precisão de 0,1 mm. Calcular a média das medidas, rejeitando o corpo de prova que não atender aos requisitos da Tabela 2.

### **6.6 Extremidades**

Com um esquadro-padrão (régua de pedreiro), verificar a planeza das superfícies de topo e base do corpo de prova. Em cada uma das faces deve ser verificada a planeza em três posições, espaçadas em  $120^\circ$ . Em cada uma, posicionar o esquadro ao longo do diâmetro e verificar o afastamento máximo entre a superfície do corpo de prova e o esquadro com um fio de aço-carbono com diâmetro de 0,5 mm, ou com um calibrador de folga. Em nenhuma das seis verificações o fio ou o calibrador de folga deve passar por eventuais espaços existentes entre a superfície e o esquadro-padrão. O corpo de prova que não atender a este requisito deve ser rejeitado.

### 6.7 Perpendicularidade das superfícies de topo e base

Com o esquadro-padrão, verificar a perpendicularidade das superfícies de topo e base do corpo de prova em duas posições, espaçadas em 90°. Colocar o esquadro-padrão sobre uma mesa plana, com sua base na posição horizontal e sua lâmina estendendo-se verticalmente. Apoiar o corpo de prova deitado sobre a base do esquadro-padrão, encostando uma das suas superfícies (topo ou base) na lâmina. Com o auxílio de um fio de carbono com diâmetro de 1,0 mm, ou de um calibrador de folga, verificar o afastamento máximo entre a superfície do corpo de prova e a lâmina que, em nenhuma das quatro verificações (duas do topo e duas da base), deve exceder 1,0 mm.

Tabela 2 - Requisitos para dimensões do corpo de prova

Item	Especificação (mm)
Diâmetro médio	98 a 104
Desvio-padrão do diâmetro	≤ 0,5
Altura	147,5 a 152,5
Planeza das superfícies de topo e base	≤ 0,5
Perpendicularidade das superfícies de topo e base	≤ 1,0

### 6.8 Volume de vazios (Vv)

Determinar o volume de vazios (Vv) do corpo de prova, em conformidade com a norma DNIT 415/2019-ME. Rejeitar o corpo de prova que não atenda à tolerância de ± 0,5 % do volume de vazios requerido.

### 6.9 Número de corpos de prova por amostra

A quantidade de corpo de prova por mistura depende da quantidade de medidas axiais de deslocamento por corpo de prova e da acurácia desejada para o módulo dinâmico médio. A Tabela 3 a seguir apresenta a acurácia estimada associada ao número de corpos de prova.

Tabela 3 - Acurácia estimada do ensaio referente ao número de transdutores e corpos de prova (CP)

Transdutores de Deslocamento por CP	Número de CP	Limite de Acurácia Estimado
2	2	± 18,0 %
2	3	± 15,0 %
2	4	± 13,4 %
3	2	± 13,1 %

3	3	± 12,0 %
3	4	± 11,5 %

## 7 Instrumentação do corpo de prova

Os transdutores de deslocamento devem ser fixados nas laterais do corpo de prova. Dependendo do modelo, devem ser utilizados pinos de apoio colados com cola epóxi, de secagem rápida, ou usar elásticos de borracha para fixar os transdutores. A Figura A4 do Anexo A mostra detalhes da montagem.

O comprimento de medida (*gauge length*) para medição das deformações axiais deve ser de 100 mm ± 1 mm, medido entre o centro dos pinos de apoio.

## 8 Ensaio

Para a realização do ensaio devem ser seguidos os procedimentos desta seção.

a) Realizar as aplicações da carga nas frequências de carregamento de 25,0; 10,0; 5,0; 1,0; 0,5 e 0,1 Hz. Usualmente realiza-se o ensaio nas temperaturas de 4, 20 e 40 °C. Cada corpo de prova, instrumentado com os transdutores, deve ser ensaiado para cada uma das combinações de temperatura e frequência de carregamento, iniciando da menor temperatura e prosseguindo para a mais alta. O ensaio, a dada temperatura, deve começar com a frequência de carregamento mais alta e prosseguir até a mais baixa;

NOTA: Pode-se realizar o ensaio em outras temperaturas, a critério do projetista. Para mistura de maior rigidez, indica-se a inclusão da temperatura de 54 °C e para mistura de menor rigidez, indica-se a inclusão da temperatura de -10 °C.

b) Colocar o corpo de prova no interior da câmara de ensaio por tempo suficiente para o equilíbrio na temperatura com tolerância de ± 0,3 °C. Para garantir a uniformidade de temperatura, deve-se utilizar um corpo de prova de uma mistura asfáltica, instrumentado para o monitoramento da temperatura interna (*dummy*). Os tempos mínimos de equilíbrio de cada temperatura são sugeridos na Tabela 4 a seguir, para o ensaio realizado com 2 a 4 corpos de prova.

Tabela 4 - Tempos recomendados de equilíbrio de temperatura

Temperatura de ensaio (°C)	Tempo de equilíbrio desde a temperatura ambiente	Tempo de equilíbrio desde a temperatura anterior de ensaio
-10	Durante a noite	Durante a noite
4	Durante a noite	4 horas
20	1 hora	3 horas
40	2 horas	2 horas
54	3 horas	1 hora

c) O corpo de prova *dummy* deve ser instrumentado com dois transdutores de temperatura, calibrados com precisão de 0,1 °C, instalados em furos: o primeiro no centro do corpo de prova e o segundo na sua seção transversal central, a 0,5 cm da borda. Para garantir a uniformidade de temperatura, deve-se condicionar os corpos de prova de uma amostra a serem ensaiados juntamente com o *dummy* nas mesmas condições iniciais. Quando as temperaturas registradas pelos dois transdutores forem iguais à especificada, deve ser realizado o ensaio;

d) Colocar a membrana redutora de atrito inferior sobre o disco de aço, no fundo da célula de carga. Colocar o corpo de prova sobre a membrana e montar os transdutores axiais. Ajustar os transdutores o mais próximo possível de sua medida máxima, para que seja possível a acumulação da deformação permanente de compressão;

e) Colocar a membrana redutora de atrito superior e o disco de aço no topo do corpo de prova. Centralizar visualmente o corpo de prova com o atuador de carga, de maneira a evitar carregamentos excêntricos;

f) Aplicar uma carga de contato mínima ( $P_{min}$ ), equivalente a 5 % da carga cíclica que será aplicada ao corpo de prova, podendo aumentar a tensão de contato até 20 kPa, para melhorar a efetividade do controle do equipamento;

g) Ajustar e balancear o sistema eletrônico de medição, caso necessário;

h) Aplicar carregamento cíclico de compressão do tipo *haversine* no corpo de prova ( $P_{dinamico}$ ). A carga cíclica deve ser ajustada, para obter deformações entre 50 e 75 micra.

A magnitude da tensão cíclica depende da rigidez do material e, geralmente, varia entre 15 e 2800 kPa. Tensões mais altas são necessárias em temperaturas mais baixas. A Tabela 5 apresenta valores típicos para níveis de tensão em função da temperatura.

Tabela 5 - Valores típicos de tensão para cada temperatura de ensaio

Temperatura (°C)	Varição (kPa)
-10	1400 a 2800
4	700 a 1400
20	350 a 700
40	140 a 250
54	35 a 70

i) No início do ensaio, pré-condicionar o corpo de prova com 200 ciclos a 25 Hz, em um nível de tensão correspondente aos da Tabela 5 desta seção. Em seguida, deve-se determinar a magnitude do carregamento que será aplicado para cada frequência. O procedimento de leitura digital, denominado *fingerprint*, pode ser usado para esta finalidade. Esse procedimento, descrito no Anexo B desta norma, visa facilitar que o ensaio seja realizado na zona viscoelástica linear.

j) O número de ciclos por carregamento deve ser o especificado na Tabela 6 a seguir. O intervalo típico de descanso entre cada frequência é de 2 minutos. Este período de repouso não deve exceder 30 minutos.

Tabela 6 - Número de ciclos para cada frequência de teste

Frequência (Hz)	Número de ciclos
25	200
10	200
5	100
1	20
0,5	15
0,1	15

## 9 Resultados

Esta seção apresenta o procedimento padrão para calcular o módulo dinâmico,  $|E^*(\omega)|$ , e o ângulo de fase,  $\theta(\omega)$ , usando os dados de uma frequência angular de carregamento específica,  $\omega$ . Também define quatro medidas de qualidade dos dados, que devem atender aos limites dispostos na seção 10, para avaliar a confiabilidade dos resultados.

### 9.1 Matrizes de dados dos ensaios

Os dados produzidos em cada ensaio a uma frequência angular  $\omega_0$  são dispostos em matrizes, uma para a

variável tempo ( $t_i$ ), uma para tensão ( $\sigma_i$ ) e uma para cada deformação lida em cada sensor de medida de deslocamento ( $\varepsilon_j$ )  $j = 1, 2, 3... m$ . A quantidade de dados  $i = 1, 2, 3... n$ , em cada matriz, será igual e depende do número de dados coletados por ciclo de carregamento. Deve-se utilizar pelo menos 50 pontos de dados por ciclo em 5 ciclos, num total de 250 pontos.

**9.2 Análise dos dados de tensão**

A análise é realizada em dados normalizados, a partir dos valores lidos de tensão subtraídos da tensão média, com a denominação de tensão centralizada.

a) Determinar a tensão média:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n} \tag{2}$$

Onde:

- $\bar{\sigma}$  = média das tensões;
- $\sigma_i$  = tensão no ponto  $i$  da matriz de dados;
- $n$  = número de pontos da matriz de dados.

b) Calcular a tensão centralizada:

$$\sigma'_i = \sigma_i - \bar{\sigma} \tag{3}$$

Onde:

- $\sigma'_i$  = tensão concentrada no ponto  $i$  da matriz de dados;
- $\sigma_i$  = tensão no ponto  $i$  da matriz de dados;
- $\bar{\sigma}$  = média das tensões.

c) Calcular três coeficientes de tensão: offset, magnitude em fase, magnitude fora de fase.

$$A_{\sigma 0} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma'_i}{n} \tag{4}$$

$$A_{\sigma 1} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \sigma'_i \cos(\omega_0 t_i) \tag{5}$$

$$B_{\sigma 1} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \sigma'_i \sen(\omega_0 t_i) \tag{6}$$

Onde:

- $A_{\sigma 0}$  = coeficiente de offset da tensão (kPa);
- $\sigma'_i$  = tensão concentrada no ponto  $i$  da matriz de dados;

- $A_{\sigma 1}$  = coeficiente da magnitude da tensão em fase (kPa);
- $\omega_0$  = frequência do carregamento (rad/s);
- $t_i$  = tempo no ponto  $i$  (s);
- $B_{\sigma 1}$  = coeficiente da magnitude da tensão fora de fase (kPa).

d) Calcular a magnitude da tensão e o ângulo de fase da tensão.

$$|\sigma^*| = \sqrt{A_{\sigma 1}^2 + B_{\sigma 1}^2} \tag{7}$$

$$\theta_{\sigma} = \arctan\left(-\frac{B_{\sigma 1}}{A_{\sigma 1}}\right) \tag{8}$$

Onde:

- $A_{\sigma 1}$  = coeficiente da magnitude da tensão em fase (kPa);
- $B_{\sigma 1}$  = coeficiente da magnitude da tensão fora de fase (kPa);
- $|\sigma^*|$  = módulo da tensão (kPa);
- $\theta_{\sigma}$  = ângulo de fase de tensão (graus).

e) Calcular a matriz da tensão centralizada prevista e o desvio padrão da tensão aplicada.

$$\hat{\sigma}_i = A_{\sigma 0} + A_{\sigma 1} \cos(\omega_0 t_i) + B_{\sigma 1} \sen(\omega_0 t_i) \tag{9}$$

$$se(\sigma) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{\sigma}'_i - \sigma'_i)^2}{n - 4}} \left(\frac{100\%}{|\sigma^*|}\right) \tag{10}$$

Onde:

- $\hat{\sigma}_i$  = tensão centrada prevista no ponto  $i$  (kPa);
- $A_{\sigma 0}$  = coeficiente de offset da tensão (kPa);
- $A_{\sigma 1}$  = coeficiente da magnitude da tensão em fase (kPa);
- $\omega_0$  = frequência do carregamento (rad/s);
- $t_i$  = tempo no ponto  $i$  (s);
- $B_{\sigma 1}$  = coeficiente da magnitude da tensão fora de fase (kPa);
- $se(\sigma)$  = erro padrão da tensão aplicada (%);
- $\sigma'_i$  = tensão concentrada no ponto  $i$  da matriz de dados;
- $n$  = número de pontos da matriz de dados;
- $|\sigma^*|$  = magnitude da tensão (kPa).

**9.3 Análise dos dados de deformação**

Deve ser realizada análise semelhante nos dados de deslocamento de cada transdutor. No entanto, neste caso, os dados são corrigidos em função da variação (*drift*) causada pela deformação permanente ocorrida durante o ensaio, e então centralizados a partir da deformação média.

a) Para estimar a variação (*drift*) nos dados de deformações, definir a matriz de cada transdutor e determinar os valores máximos e mínimos e a que tempo eles ocorreram em cada ciclo de carga. Determinar, a seguir, a inclinação dos valores máximos e dos valores mínimos em relação ao tempo, por regressão linear. A média dos dois coeficientes angulares será a taxa de variação  $D_j$  para cada transdutor  $j$ .

b) Determinar a deformação média para cada transdutor:

$$\bar{\epsilon}_j = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_{ji}}{n} \quad (11)$$

Onde:

- $\bar{\epsilon}_j$  = média das deformações do transdutor  $j$ ;
- $\epsilon_{ji}$  = deformação do transdutor  $j$  no ponto  $i$ ;
- $n$  = número de pontos.

c) Corrigir e centralizar os dados de deformação de cada transdutor de deslocamento:

$$\epsilon'_{ji} = \epsilon_{ji} - D_j t_i - \bar{\epsilon}_j \quad (12)$$

Onde:

- $\epsilon'_{ji}$  = deformação corrigida e centralizada para o transdutor  $j$  no ponto  $i$  na matriz de dados;
- $\epsilon_{ji}$  = deformação medida no transdutor  $j$  no ponto  $i$  na matriz de dados;
- $D_j$  = taxa de acumulação de deformação plástica para o transdutor  $j$ ;
- $t_i$  = tempo no ponto  $i$  (s);
- $\bar{\epsilon}_j$  = deformação média no transdutor  $j$ .

d) Calcular três coeficientes de deformação: offset, magnitude em fase, magnitude fora de fase.

$$A_{\epsilon_j 0} = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon'_{ji}}{n} \quad (13)$$

$$A_{\epsilon_j 1} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon'_{ji} \cos(\omega_0 t_i) \quad (14)$$

$$B_{\epsilon_j 1} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon'_{ji} \text{sen}(\omega_0 t_i) \quad (15)$$

Onde:

- $A_{\epsilon_j 0}$  = coeficiente de offset da deformação no transdutor  $j$ ;
- $\epsilon'_{ji}$  = deformação concentrada no ponto  $i$  do transdutor  $j$  da matriz de dados;
- $A_{\epsilon_j 1}$  = coeficiente da magnitude da deformação em fase;
- $\omega_0$  = frequência do carregamento (rad/s);
- $t_i$  = tempo no ponto  $i$  (s);
- $B_{\epsilon_j 1}$  = coeficiente da magnitude da deformação fora de fase.

e) Calcular a magnitude da deformação e o ângulo de fase da deformação para cada LVDT:

$$|\epsilon_j^*| = \sqrt{A_{\epsilon_j 1}^2 + B_{\epsilon_j 1}^2} \quad (16)$$

$$\theta_{\epsilon_j 1} = \arctan\left(-\frac{B_{\epsilon_j 1}}{A_{\epsilon_j 1}}\right) \quad (17)$$

Onde:

- $|\epsilon_j^*|$  = magnitude da deformação no transdutor  $j$ ;
- $A_{\epsilon_j 1}$  = Coeficiente da magnitude da deformação em fase;
- $B_{\epsilon_j 1}$  = Coeficiente da magnitude da deformação fora de fase;
- $\theta_{\epsilon_j 1}$  = Ângulo de fase de deformação no transdutor  $j$  (graus).

f) Para cada LVDT, calcular a matriz da deformação corrigida e centralizada prevista e o desvio padrão da deformação.

$$\hat{\epsilon}_{ji} = A_{\epsilon_j 0} + A_{\epsilon_j 1} \cos(\omega_0 t_i) + B_{\epsilon_j 1} \text{sen}(\omega_0 t_i) \quad (18)$$

$$se(\epsilon_j) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{\epsilon}_{ji} - \epsilon'_{ji})^2}{n-4}} \left( \frac{100\%}{|\epsilon_j^*|} \right) \quad (19)$$

Onde:

- $\hat{\epsilon}'_{ji}$  = deformação centrada prevista no transdutor  $j$  no ponto  $i$ ;
- $A_{\epsilon_j 0}$  = coeficiente de offset da deformação no transdutor  $j$ ;
- $A_{\epsilon_j 1}$  = coeficiente da magnitude da deformação em fase;
- $\omega_0$  = frequência do carregamento (rad/s);
- $t_i$  = tempo no ponto  $i$  (s);
- $B_{\epsilon_j 1}$  = coeficiente da magnitude da deformação fora de fase;
- $se(\epsilon_j)$  = erro padrão de deformação no transdutor  $j$  (%);
- $\epsilon'_{ji}$  = deformação concentrada no ponto  $i$  do transdutor  $j$  da matriz de dados;
- $n$  = número de pontos da matriz de dados;
- $|\epsilon_j^*|$  = magnitude da deformação no transdutor  $j$ .

g) Calcular o ângulo de fase médio, a magnitude da deformação e o desvio padrão para o transdutor  $m$ , assim como dois coeficientes de uniformidade que representam a variação entre os transdutores.

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{j=1}^m \theta_{\epsilon_j}}{m} \quad (20)$$

$$|\bar{\epsilon}^*| = \frac{\sum_{j=1}^m |\epsilon_j^*|}{m} \quad (21)$$

$$se(\epsilon) = \frac{\sum_{j=1}^m se(\epsilon_j)}{m} \quad (22)$$

$$U_{\epsilon} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (|\epsilon_{j^*}| - |\epsilon^*|)^2}{m-1}} \left( \frac{100\%}{|\epsilon^*|} \right) \quad (23)$$

$$U_{\theta} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (\theta_{\epsilon_j} - \bar{\theta})^2}{m-1}} \quad (24)$$

Onde:

- $\bar{\theta}$  = ângulo de fase médio para todos os transdutores (graus);
- $m$  = número de transdutores;
- $|\bar{\epsilon}^*|$  = média da magnitude da deformação;
- $se(\epsilon)$  = erro padrão médio para todos os transdutores (%);
- $U_{\epsilon}$  = coeficiente de uniformidade dos transdutores de deslocamento (%);
- $U_{\theta}$  = coeficiente de uniformidade do ângulo de fase (graus).

**9.4 Cálculo do ângulo de fase e o módulo dinâmico**

O último passo na análise dos dados é calcular o ângulo e fase,  $\theta(\omega)$ , em graus, e o módulo dinâmico,  $|E^*(\omega)|$ , em kPa, na frequência  $\omega$ :

$$\theta(\omega) = \bar{\theta}_{\epsilon} - \theta_{\sigma} \quad (25)$$

$$|E^*(\omega)| = \frac{|\sigma^*|}{|\bar{\epsilon}^*|} \quad (26)$$

Onde:

- $\theta(\omega)$  = ângulo de fase entre tensão e deformação para a frequência  $\omega$  (graus);
- $\bar{\theta}_{\epsilon}$  = ângulo de fase médio para todos os transdutores (graus);
- $\theta_{\sigma}$  = ângulo de fase de tensão (graus);
- $|E^*(\omega)|$  = módulo dinâmico para a frequência  $\omega$  (kPa);
- $|\sigma^*|$  = magnitude da tensão (kPa);
- $|\bar{\epsilon}^*|$  = média da magnitude da deformação.

**10 Qualidade dos dados**

Além do módulo dinâmico e do ângulo de fase, quatro indicadores de qualidade dos dados podem ser calculados a partir da seção 9: (1) desvio padrão da tensão aplicada; (2) desvio padrão médio das medidas de deformação; (3) coeficiente de uniformidade das medidas de deformação; e (4) coeficiente de uniformidade das medidas de ângulo de fase. A Tabela 7 apresenta os limites para esses indicadores.

Tabela 7 - Limites de qualidade recomendados

Indicador	Símbolo	Equação	Limite
Erro padrão da tensão aplicada	$se(\sigma)$	10	$\leq 10\%$
Média do erro padrão da deformação medida	$se(\epsilon)$	22	$\leq 10\%$
Coeficiente de uniformidade das deformações medidas	$U_{\epsilon}$	23	$\leq 35\%$
Coeficiente de uniformidade dos ângulos de fase medidos	$U_{\theta}$	24	$\leq 3^{\circ}$

**11 Curva mestra**

Esta seção descreve o procedimento para o desenvolvimento de curvas mestras de módulo dinâmico para concretos asfálticos usando os módulos dinâmicos determinados de acordo com a seção 9. Para tal, deve-se usar o princípio da superposição tempo- (ou frequência-) temperatura para gerar curvas de módulo dinâmico para uma determinada temperatura de

referência, em um intervalo de frequências muito mais amplo do que o adotado nos ensaios de laboratório. Os passos deste procedimento são indicados a seguir:

- Calcular as médias dos  $|E^*|$  e ângulos de fase, os coeficientes de variação do  $|E^*|$  e os desvios padrão do ângulo de fase dos corpos de prova ensaiados para cada par de temperatura e frequência. Os dados devem ser apresentados conforme a Tabela 8;
- Plotar o  $|E^*|$  graficamente em função da frequência de carregamento em escala log-log visando obter um número de segmentos de curva igual à quantidade de temperaturas ensaiadas, conforme mostra o exemplo da Figura 1 adiante, em que três segmentos são mostrados;
- Escolher uma temperatura de referência ( $T_r$ ), em que um segmento de curva permanece fixo e os demais segmentos de curva são transladados no eixo horizontal para gerar uma curva única e contínua, que passa pelo segmento de curva da  $T_r$ . Usualmente se emprega 20 °C como  $T_r$ ;
- Usar a Equação 27 para realizar a translação do segmento de curva de cada temperatura de ensaio pela multiplicação da frequência de ensaio por valores entre 0 e 1, para deslocar o segmento de curva para a esquerda, e por valores maiores do que 1, para deslocar o segmento de curva para a direita, de modo a se obter uma curva única. Esses fatores de multiplicação são chamados de fatores de deslocamento ( $a_T$ ). As novas frequências obtidas são chamadas de frequências reduzidas.

$$f_r = f a_T \quad (27)$$

Onde:

- $f_r$  = frequência reduzida;
- $f$  = frequência de ensaio;
- $a_T$  = fator de deslocamento.

• Após ajustados os segmentos de curvas para a criação da curva mestra na  $T_r$ , deve-se plotar o  $a_T$ , em escala logarítmica, de cada segmento pela temperatura de ensaio, como indicado na Figura 2. Com estes pontos, obtêm-se, por regressão, os coeficientes de uma equação polinomial de segundo grau, de acordo com a Equação 28. A partir dessa equação, é possível deslocar a curva mestra para qualquer outra temperatura, diferente da  $T_r$ . Deve-se evitar a

extrapolação da temperatura escolhida para a criação da curva mestra, optando por valores intermediários entre a maior e a menor temperatura ensaiada.

$$\log a_T = a_1 T^2 + a_2 T + a_3 \quad (28)$$

Onde:

$a_1, a_2$  e  $a_3$  = coeficientes de ajuste;

$T$  = temperatura de ensaio °C;

$a_T$  = fator de deslocamento.

• A curva mestra pode ser ajustada por uma função sigmoidal, como indicado na Equação 29. O ajuste pode ser realizado utilizando a ferramenta Solver, no software Excel®. Esse cálculo é realizado pela minimização da soma dos quadrados dos erros existentes entre o  $|E^*|$  medido em cada par temperatura - frequência e o  $|E^*|$  calculado pela função sigmoidal, como mostrado na Equação 30. Para a determinação dos coeficientes da função sigmoidal, é definido como objetivo da função Solver que o somatório dos erros quadráticos seja igual a zero e que haja somente variação nos coeficientes de ajuste ( $\delta, \alpha, \beta$  e  $\gamma$ ). Aplicada essa função, o programa define os valores dos coeficientes que modelam a curva de módulo dinâmico.

$$\log|\hat{E}^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log f_r}} \quad (29)$$

$$\sum erro^2 = \sum_1^n (\log|\hat{E}^*| - \log|E^*|)^2 \quad (30)$$

Onde:

$|\hat{E}^*|$  = módulo dinâmico previsto;

$|E^*|$  = módulo dinâmico ensaiado;

$\delta, \alpha, \beta$  e  $\gamma$  = coeficientes de ajuste;

$f_r$  = frequência reduzida.

## 12 Relatório

Reportar no início do relatório:

- Tipo de prensa e de Extensor;
- Tamanho do corpo de prova;

- Tempo de armazenamento do corpo de prova antes da realização do ensaio

Reportar as seguintes informações, para cada corpo de prova, em cada combinação de temperatura e frequência ensaiada:

- Temperatura do ensaio.
- Frequência do ensaio.
- Módulo dinâmico (equação 26).
- Ângulo de fase médio entre a tensão aplicada e a deformação medida (equação 25).
- Magnitude média da deformação (equação 21).

- Magnitude da tensão (equação 7).
- Desvio padrão da tensão aplicada (equação 10).
- Desvio padrão médio das deformações medidas (equação 22).
- Coeficiente de uniformidade das deformações medidas (equação 23).
- Coeficiente de uniformidade dos ângulos de fase medidos (equação 24).

Reportar os parâmetros da curva mestra representativa do ensaio de Módulo Dinâmico.

**Tabela 8 - Exemplo de planilha para apresentação de dados do módulo dinâmico**

Condição		CP 1		CP 2		Módulo Dinâmico		Ângulo de Fase	
Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Módulo Dinâmico (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)	Módulo Dinâmico (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)	Média (Mpa)	Coeficiente de Variação (%)	Média (graus)	Desvio Padrão (graus)
4	25	27220,1	6,8	26429,8	6,7	26824,9	2,1	6,8	0,1
4	10	24566,1	8,9	23818,4	8,9	24192,2	2,2	8,9	0,0
4	5	22524,8	9,9	22206,9	9,8	22365,9	1,0	9,8	0,1
4	1	18296,3	12,5	18374,2	12,2	18335,3	0,3	12,3	0,3
4	0,5	16113,4	13,8	16305,5	13,4	16209,5	0,8	13,6	0,3
4	0,1	12330,0	17,1	12680,8	16,5	12505,4	2,0	16,8	0,5
20	25	13094,2	17,8	13063,2	17,9	13078,7	0,2	17,9	0,1
20	10	10367,0	20,3	10722,5	20,6	10544,8	2,4	20,5	0,2
20	5	8618,1	22,3	8675,2	22,0	8646,7	0,5	22,1	0,2
20	1	5535,6	26,9	5570,2	26,4	5552,9	0,4	26,7	0,4
20	0,5	4255,8	29,5	4338,6	28,9	4297,2	1,4	29,2	0,4
20	0,1	2204,6	34,4	2169,8	34,2	2187,2	1,1	34,3	0,1
40	25	3103,4	31,9	2851,8	32,0	2977,6	6,0	31,9	0,0
40	10	1813,2	35,5	1639,2	36,1	1726,2	7,1	35,8	0,4
40	5	1161,0	38,9	1003,9	40,3	1082,5	10,3	39,6	1,0
40	1	457,2	40,8	417,2	38,9	437,2	6,5	39,8	1,3
40	0,5	289,8	40,6	278,2	38,8	284,0	2,9	39,7	1,3
40	0,1	194,2	27,8	207,1	24,7	200,7	4,5	26,2	2,2

**Figura 1 - Exemplo de construção da curva mestra de módulo dinâmico**

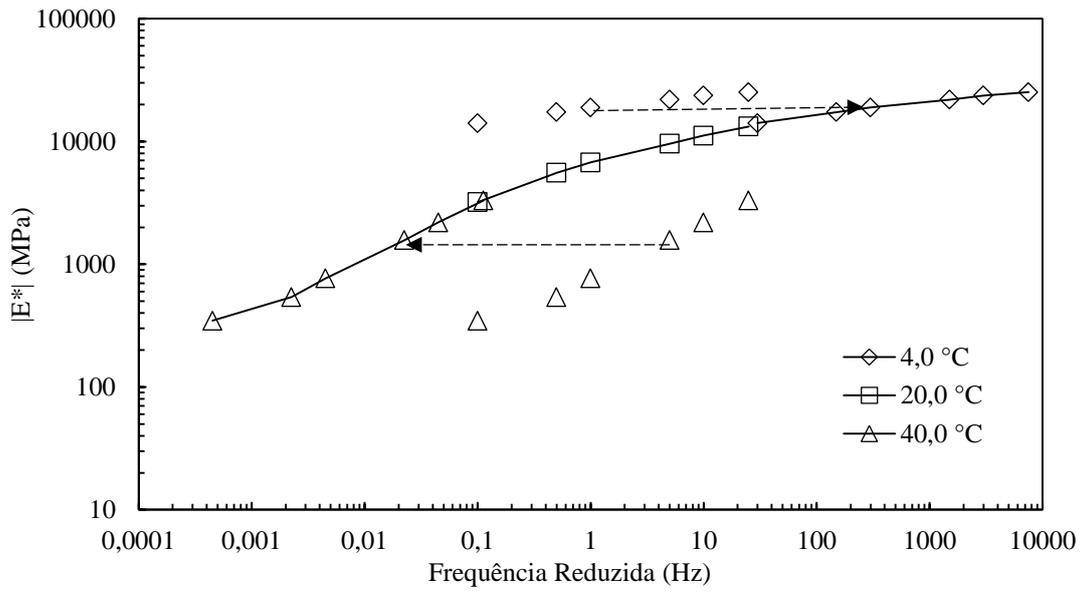
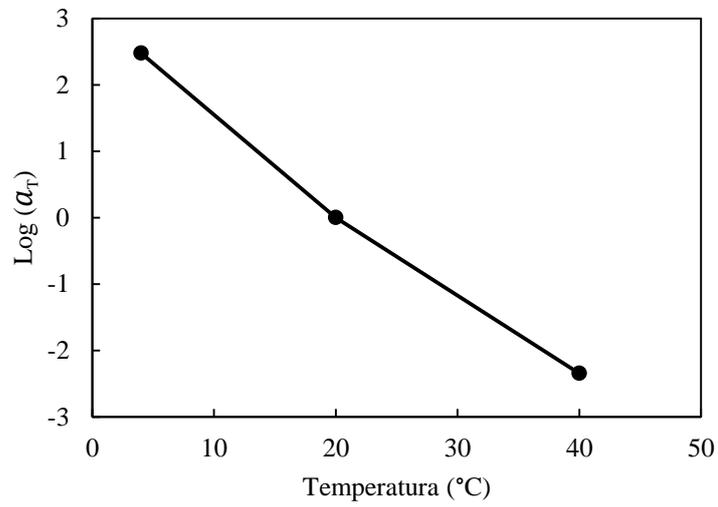


Figura 2 - Exemplo da variação do  $\log(a_T)$  pela temperatura de ensaio



Anexo A (Normativo)

Figura A1 - Esquema da forma de aplicação da carga cíclica e da resposta de deformação no ensaio de módulo dinâmico axial, mostrando o ângulo de fase

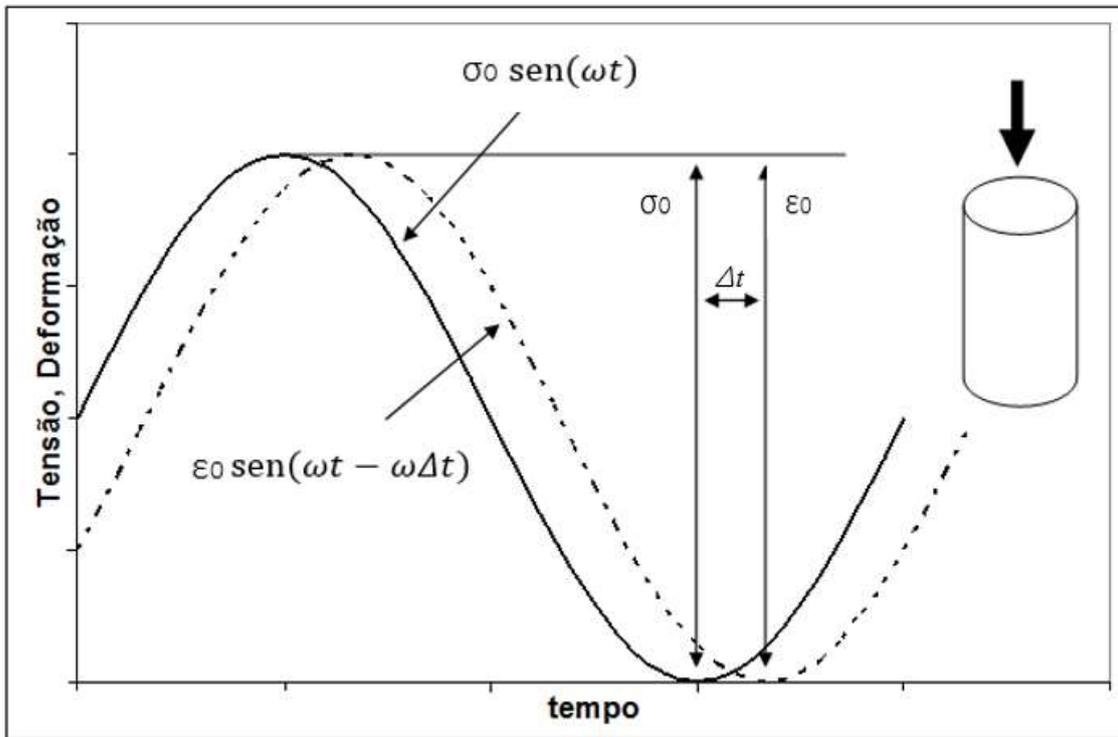


Figura A2 - Ilustração do esquema geral do corpo de prova no ensaio com dois medidores de deslocamento

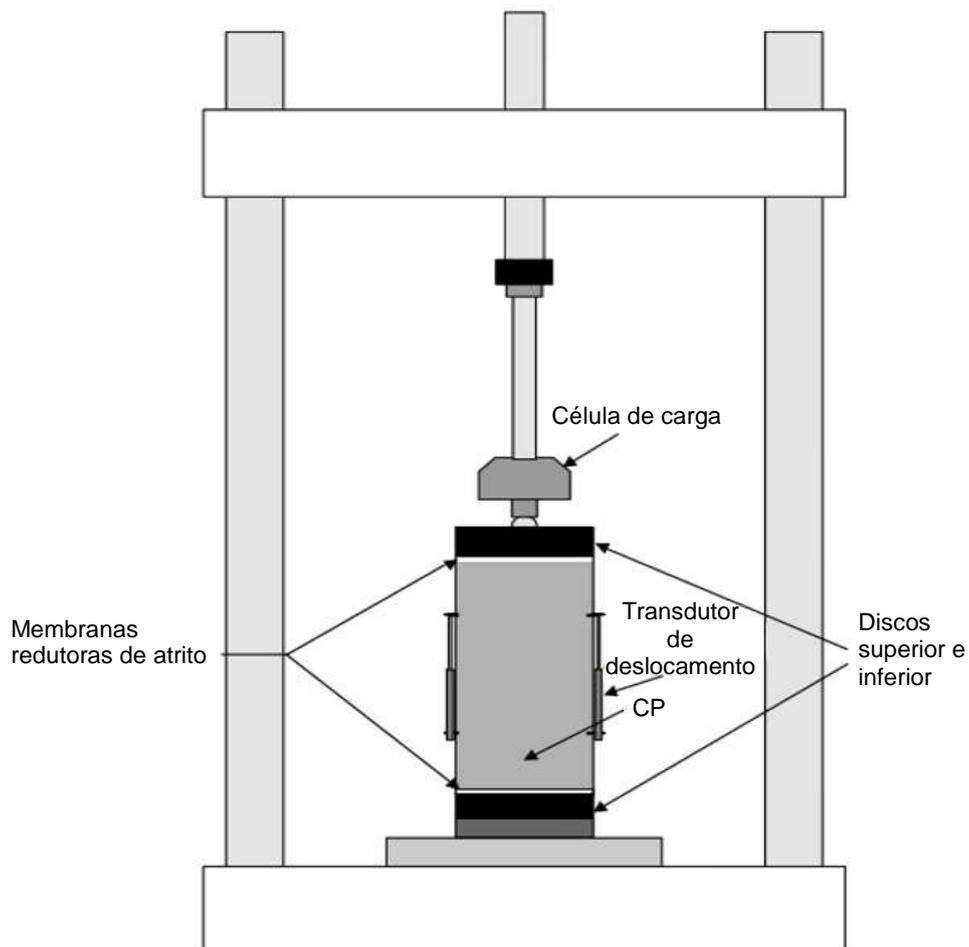


Figura A3 - Esquema geral dos pontos de medição de deslocamentos no ensaio de módulo dinâmico axial

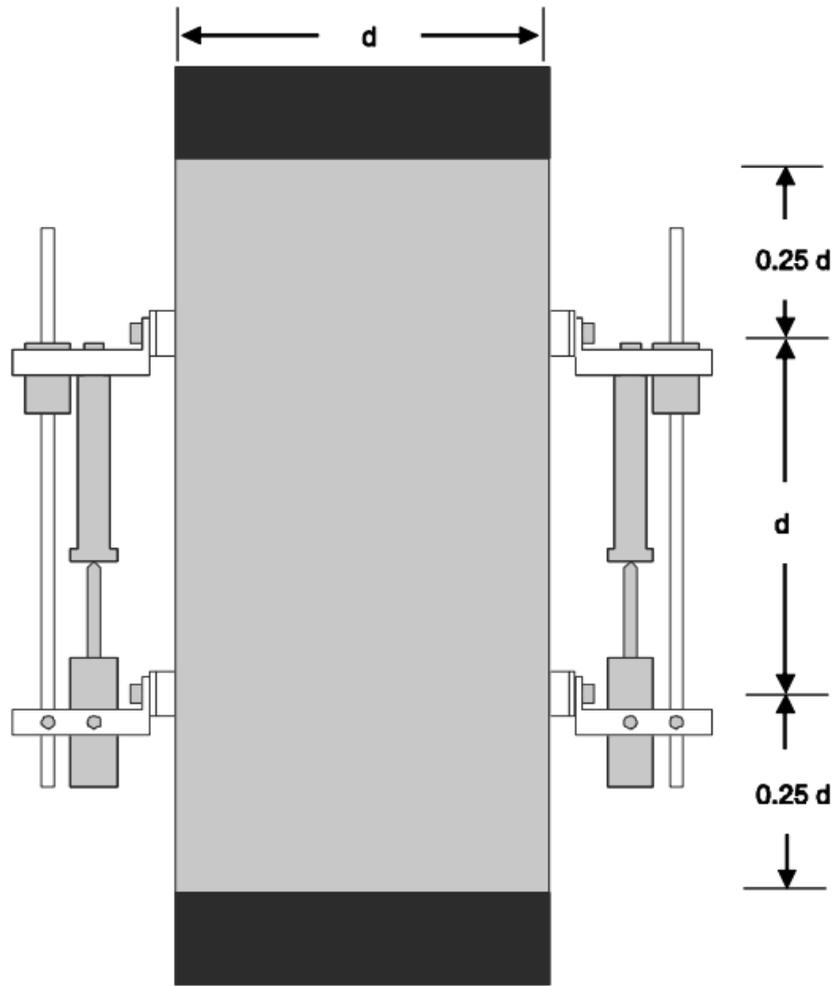
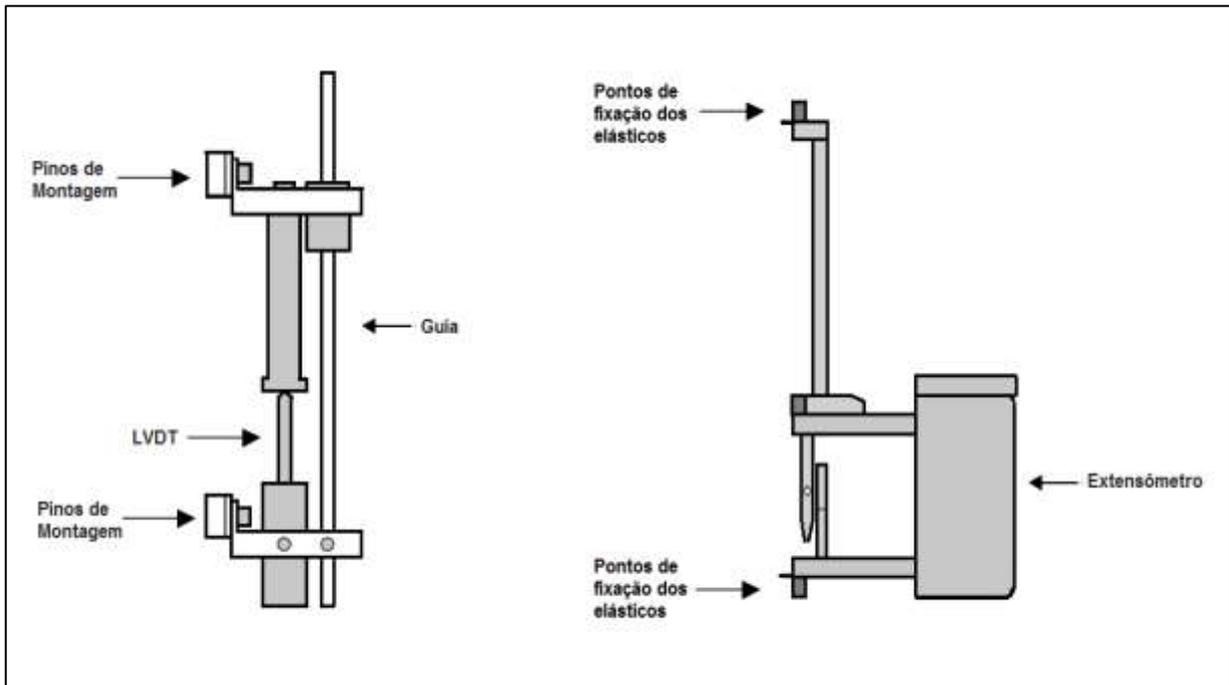


Figura A4 - Detalhes da montagem dos transdutores de medidas de deslocamentos no ensaio de módulo dinâmico



### Anexo B (Normativo)

O procedimento *fingerprint* para determinação dos níveis de tensão a serem aplicados no carregamento cíclico é realizado para cada corpo de prova, a cada temperatura de ensaio, na frequência de 10 Hz, e tem como objetivo garantir que o material seja ensaiado dentro dos limites de linearidade. Esse procedimento é realizado posteriormente ao condicionamento do corpo de prova e previamente ao ensaio de módulo dinâmico.

1. Arbitram-se valores de módulo dinâmico ( $|E^*|_{est}$ ) para cada frequência a ser ensaiada em uma determinada temperatura. Estes valores devem ser o mais próximo possível dos módulos reais da mistura asfáltica. Valores de referência de módulo dinâmico para misturas densas de tamanho máximo nominal de 19 mm são indicados na Tabela B1, como referência inicial.
2. Calcula-se uma carga cíclica que resulte em uma deformação de 30 micra na frequência de 10 Hz na temperatura de ensaio. O valor desta carga é calculado pela Equação (B1). Multiplica-se a deformação de 30 micra pelo  $|E^*|_{est}$ , a 10 Hz, para obter a tensão correspondente. A multiplicação da tensão pela área da seção do corpo de prova resulta no valor da carga a ser aplicada pelo equipamento.

$$F = A\varepsilon |E^*|_{est} \quad (B1)$$

Onde:

- $F$  = carga aplicada (N);  
 $A$  = área da seção do CP(m<sup>2</sup>);  
 $\varepsilon$  = deformação desejada ( $\mu$ );  
 $|E^*|_{est}$  = módulo dinâmico estimado (MPa).

3. Definida a carga, aplica-se o carregamento, registrando-se o *fingerprint* e obtém-se a amplitude da carga medida pela célula de carga e os deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamento. Com estes valores, calcula-se o módulo dinâmico do *fingerprint* ( $|E^*|_{FP}$ ).
4. A seguir, obtém-se um fator de ajuste ( $k$ ), que é dado pela razão entre o  $|E^*|_{FP}$  e o  $|E^*|_{est}$ , conforme Equação B2. Este fator é utilizado para multiplicar os módulos dinâmicos arbitrados de todas as frequências de ensaio em determinada temperatura. Assim, obtém-se novos módulos dinâmicos, tornando possível calcular as cargas cíclicas a serem aplicadas em cada par frequência e temperatura, de acordo com a Equação B3, porém utilizando a deformação alvo de ensaio de 63 micra (centro da faixa admitida).

$$k = \frac{|E^*|_{FP}}{|E^*|_{est}} \quad (B2)$$

$$F = A\varepsilon |E^*|_{est} k \quad (B3)$$

Onde:

- $k$  = fator de ajuste;  
 $|E^*|_{FP}$  = módulo dinâmico do *fingerprint* (MPa);

5. Este procedimento deve ser repetido para os outros corpos de prova que são ensaiados na mesma temperatura. Para estes, utilizam-se como valores de  $|E^*|_{est}$  os  $|E^*|$  obtidos a partir do teste com o primeiro corpo de prova.

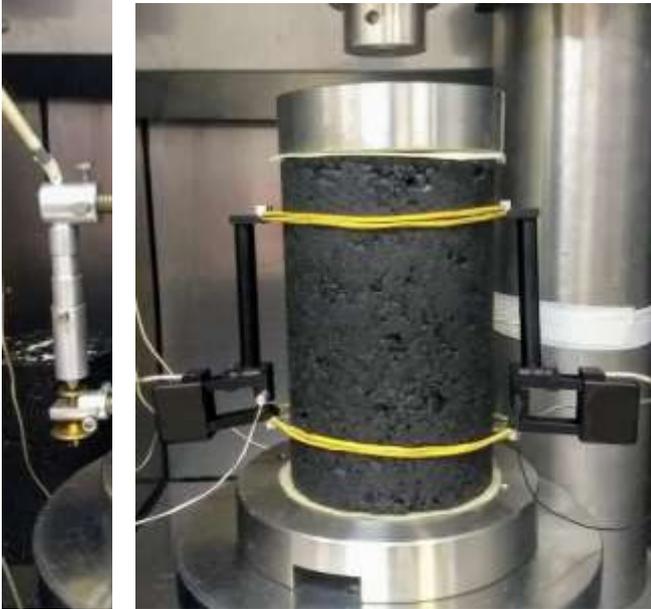
**Tabela B1 - Valores de referência para módulo dinâmico de misturas brasileiras densas com TMN = 19 mm**

Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	$ E^* _{est.}$ (MPa) CAP 30/45	$ E^* _{est.}$ (MPa) CAP 50/70	$ E^* _{est.}$ (MPa) AMP 60/85
4	25	22100	21600	17500
4	10	20500	20400	16600
4	5	19700	19400	15700
4	1	17500	16600	13500
4	0,5	16400	15000	12700
4	0,1	13800	12100	10100
20	25	12900	10900	10700
20	10	11200	9300	9100
20	5	9800	7900	7100
20	1	7300	5300	5200
20	0,5	6100	4200	3600
20	0,1	3900	2200	2600
40	25	4100	2900	2800
40	10	2800	1900	2000
40	5	2100	1300	1400
40	1	900	500	650
40	0,5	700	360	450
40	0,1	350	160	230

/Anexo C

Anexo C (Informativo)

Figura C1 - Exemplos de corpos de prova preparados para o ensaio de módulo dinâmico axial



\_\_\_\_\_/Anexo D

## Anexo D (Informativo) - Bibliografia

- a) AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. *AASHTO PP 61: Standard practice for developing dynamic modulus master curves for hot mix asphalt using the asphalt mixture performance tester (AMPT)*. Washington, DC, 2013.
- b) \_\_\_\_\_. *AASHTO T 312-15: Standard method of test for preparing and determining the density of asphalt mixture specimens by means of the superpave gyratory compactor*. Washington, DC,
- c) \_\_\_\_\_. *AASHTO T 342: Standard method of test for determining the dynamic modulus of hot mix asphalt (HMA)*. Washington, DC, 2011.
- d) BERNUCCI, L. B. et al. *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. 3. reimpr. Rio de Janeiro: PETROBRAS; ABEDA, 2010.
- e) BONAQUIST, R. F. Ruggedness testing of the dynamic modulus and flow number tests with the simple performance. *NCHRP Report 629*, Washington, DC, n. 629, 2008.
- f) GOUVEIA B. C. S. Métodos de previsão e determinação de módulo dinâmico de misturas asfálticas aplicadas em rodovias brasileiras. 2016. 97p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes)-Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- g) MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. *Mecânica dos pavimentos*. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.
- h) NASCIMENTO, L. A. H. *Implementation and validation of the viscoelastic continuum damage theory for asphalt mixture and pavement analysis in Brazil*. 2015. 337p. Tese (Doutorado em Filosofia)-North Carolina State University, Raleigh, 2015. Disponível em: <<https://repository.lib.ncsu.edu/handle/1840.16/10651>>. Acesso em: 09 ago. 2018.
- i) WITZACK, M. W. et al. Simple performance test for superpave mix design. *NCHRP Report 465*, Washington, DC, n. 465, 2002. Disponível em: <[http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp\\_rpt\\_465.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_465.pdf)>. Acesso em: 08 ago. 2018.

\_\_\_\_\_/Índice geral

## Índice geral

Abstract.....	1	Instrumentação do corpo de prova.....	7.....5
Altura.....	6.5.....4	Matrizes de dados dos ensaios.....	9.1.....6
Análise dos dados de deformação.....	9.3.....7	Membranas redutoras de atrito.....	4.7.....3
Análise dos dados de tensão.....	9.2.....6	Módulo Complexo.....	3.1.....2
Anexo A (Normativo).....	13	Módulo Dinâmico.....	3.2.....2
Anexo B (Normativo).....	15	Número de corpos de prova por amostra.....	6.9.....5
Anexo C (Informativo).....	17	Objetivo.....	1.....1
Anexo D (Informativo) - Bibliografia.....	18	Perpendicularidade das superfícies de topo e base.....	6.7.....4
Ângulo de Fase.....	3.3.....2	Prefácio.....	1.....1
Aparelhagem.....	4.....2	Prensa.....	4.1.....2
Armazenamento.....	6.3.....4	Preparação do corpo de prova.....	6.....4
Cálculo do ângulo de fase e o módulo dinâmico.....	9.4.....9	Qualidade dos dados.....	10.....9
Calibração dos Equipamentos.....	5.....3	Referências normativas.....	2.....2
Câmara de temperatura.....	4.2.....3	Relatório.....	12.....10
Célula de carga eletrônica.....	4.4.....3	Resultados.....	9.....6
Compactador giratório.....	4.8.....3	Resumo.....	1.....1
Curva mestra.....	11.....9	Sistema de aquisição de dados.....	4.3.....3
Curva mestra de módulo dinâmico.....	3.4.....2	Sumário.....	1.....1
Definições.....	3.....2	Tabela 1 - Resolução e Acurácia.....	3.....3
Diâmetro.....	6.4.....4	Tabela 2 - Requisitos para dimensões.....	5.....5
Discos superior e inferior.....	4.6.....3	Tabela 3 - Acurácia estimada.....	5.....5
Ensaio.....	8.....5	Tabela 4 - Tempos recomendados.....	5.....5
Envelhecimento.....	6.2.....4	Tabela 5 - Valores típicos de tensão.....	6.....6
Extremidades.....	6.6.....4	Tabela 6 - Número de ciclos.....	6.....6
Figura 1 - Exemplo de construção da curva mestra.....	11	Tabela 7 - Limites de qualidade.....	9.....9
Figura 2 - Exemplo da variação do log ( $a_T$ ).....	12	Tabela 8 - Exemplo de planilha.....	11.....11
Índice geral.....	19	Tamanho.....	6.1.....4
		Transdutor de deslocamento eletrônico.....	4.5.....3
		Volume de vazios.....	6.8.....5