

## CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DO MÓDULO COMPLEXO DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS

Rui S. Moreira\* e José D. Rodrigues\*\*

\* Departamento de Engenharia Mecânica  
Universidade de Aveiro  
Campus Santiago  
3810-193 Aveiro. Portugal  
e-mail: rmoreira@mec.ua.pt, web <http://www.mec.ua.pt>

\*\* Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Rua Dr. Roberto Frias, s/n  
4200-465 Porto. Portugal  
e-mail: jdr@fe.up.pt, web <http://www.fe.up.pt>

**Palavras-chave:** Módulo complexo, material viscoelástico, caracterização de propriedades

**Resumo.** *A dificuldade associada à determinação experimental das propriedades dos materiais viscoelásticos, nomeadamente o seu módulo complexo, conduziu à necessidade de desenvolver uma metodologia e equipamento experimental que permitisse caracterizar convenientemente esta propriedade em materiais viscoelásticos usualmente empregues em tratamentos passivos de amortecimento. Em alternativa aos métodos aproximados normalmente empregues na caracterização destes materiais, calculando as propriedades através da perturbação dinâmica introduzida em vigas metálicas tratadas, optou-se por aplicar um método de medição directa, desenvolvendo experimentalmente uma montagem representativa de um sistema dinâmico com um grau de liberdade. São expostas as dificuldades encontradas na obtenção da montagem experimental pretendida, nomeadamente a restrição de movimentos espúrios e rigidez da base de ligação. A metodologia e a montagem experimental propostas são aplicadas na caracterização do módulo de corte complexo de um material comercialmente disponível para tratamentos passivos de amortecimento viscoelástico, confrontando os resultados obtidos com o nomograma fornecido pelo fabricante do material.*

## 1. INTRODUÇÃO

Os tratamentos passivos com camadas de material viscoelástico permitem introduzir uma capacidade significativa de amortecimento em estruturas flexíveis e esbeltas.

Este amortecimento advém da capacidade destes materiais dissiparem grandes quantidades de energia de deformação, sob a forma de calor para o meio envolvente, quando deformados de forma cíclica e contínua. De facto, a estrutura destes materiais, na forma de cadeias moleculares longas e reticuladas, permite que, quando deformadas, convertam para a forma de energia térmica uma parte significativa da energia de deformação associada ao movimento vibratório da estrutura base.

Apesar do contínuo e crescente interesse neste tipo de tratamentos, nomeadamente nas indústrias aeronáutica, aeroespacial e automóvel, o projecto e optimização destes tratamentos assume um papel importante no desenvolvimento de produtos mais fiáveis, mais leves e, acima de tudo, mais seguros. Embora a aplicação deste tipo de tratamentos seja relativamente simples e pouco dispendiosa, a simulação pelo método dos elementos finitos do efeito introduzido na estrutura base requer, para além de um procedimento de discretização espacial complexo e próprio [1, 2], a correcta caracterização das propriedades do material viscoelástico que constitui a camada de amortecimento, propriedades essas que dependem fortemente da temperatura da aplicação e da frequência da deformação imposta.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS VISCOELÁSTICOS

A maioria dos materiais viscoelásticos com interesse para aplicação em tratamentos de amortecimento são de base polimérica e podem ser considerados homogéneos, uma vez que as suas propriedades são sensivelmente idênticas em todo o volume da amostra de material, e isotrópicos, ou seja, as suas propriedades são idênticas em qualquer direcção. No entanto, alguns materiais especialmente formulados, contendo fibras direccionais [3] ou obtidos por laminação de camadas de materiais diferentes, não usufruem destas propriedades que, tanto no processo de caracterização das propriedades como no processo de simulação, permitem um tratamento analítico mais simples.

O conjunto de materiais viscoelásticos com interesse em aplicações de amortecimento é muito vasto, desde plásticos de elevada rigidez a adesivos de baixo valor de módulo de ganho, usualmente empregues em tratamentos superficiais com restrição.

Embora estes materiais possuam uma constituição homogénea e isotrópica, e, principalmente, apresentem um comportamento linear (dentro de certos limites de amplitude de deformação), as suas propriedades dependem fortemente da temperatura e da frequência de deformação. De facto, o comportamento mecânico de um material viscoelástico depende sobretudo do comportamento das suas longas cadeias moleculares, as quais interagem entre si conforme a temperatura do material e a frequência ou velocidade da perturbação causada na configuração molecular inicial.

## 2.1. Efeito da temperatura

A temperatura de funcionamento de mecanismos de amortecimento baseados em materiais viscoelásticos pode, consoante a aplicação a que se destinam, atingir valores extremos, desde  $-46^{\circ}\text{C}$  (ou até menos) até  $150^{\circ}\text{C}$  [4].

Uma vez que a capacidade de amortecimento e rigidez de um material viscoelástico está sobretudo relacionada com a sua temperatura de transição, temperatura à qual se dá a passagem do seu estado vítreo (material com elevada rigidez) para o seu estado amorfo (material com baixo valor de rigidez) e à qual o material apresenta o seu valor máximo de amortecimento, a eficiência do tratamento de amortecimento depende fortemente da relação entre a temperatura de funcionamento e a temperatura de transição do material.

## 2.2. Efeito da frequência

Quando um material viscoelástico é deformado, as longas cadeias moleculares que constituem o material sofrem uma perturbação da sua posição inicial de equilíbrio, interagindo entre si como forma de reacção à deformação imposta. Em resposta a esta perturbação dá-se um rearranjo das cadeias moleculares, atingindo, desta forma, uma nova posição de equilíbrio.

Se a deformação imposta for cíclica do tipo harmónico, as cadeias moleculares, em resposta a essa deformação, atingem um estado de equilíbrio dinâmico, respondendo em sintonia com a excitação.

Desta forma, quando um material viscoelástico é solicitado ciclicamente com uma frequência elevada, este apresenta uma elevada rigidez, possuindo uma rigidez mais reduzida quando a solicitação tem uma frequência mais baixa.

## 2.3. Módulo complexo

Em regime harmónico, o campo de tensões a que um material viscoelástico está sujeito, em resultado da aplicação de um carregamento do tipo harmónico, pode ser relacionado com o campo de deformações através de um parâmetro complexo, designado por módulo complexo, na forma:

$$\sigma = \bar{E}\varepsilon \quad (1)$$

O módulo complexo extensional [5] de um material viscoelástico é uma entidade de natureza complexa descrito como:

$$\bar{E}(\omega, T) = E'(\omega, T) + jE''(\omega, T) \quad (2)$$

A componente real do módulo complexo,  $E'$ , designa-se por módulo de ganho [5] e representa a capacidade de armazenamento de energia de deformação do material. A componente imaginária,  $E''$ , define a capacidade de dissipação do material viscoelástico e designa-se por módulo

de perda [5]. O factor de perda  $\eta$  [5], definido como a razão entre o módulo de perda e o módulo de ganho do material, pode, em regime harmónico estacionário, relacionar-se com a razão de amortecimento  $\xi$  pela relação:  $\eta = 2\xi$ .

De forma homóloga, o módulo de corte complexo é definido como:

$$\tilde{G}(\omega, T) = G'(\omega, T) + jG''(\omega, T) \quad (3)$$

O módulo complexo permite representar, de uma forma simples, o amortecimento viscoelástico e modelizar o efeito viscoelástico em regime estacionário harmónico [1].

### 3. MEDIÇÃO DO MÓDULO COMPLEXO DOS MATERIAIS VISCOELÁSTICOS

A caracterização das propriedades dos materiais viscoelásticos constitui um dos pontos essenciais na simulação numérica do comportamento dinâmico de tratamentos passivos viscoelásticos.

O processo de medição do módulo complexo de um material viscoelástico reveste-se de um conjunto de características e requisitos que o tornam numa tarefa difícil, requerendo um procedimento de medição rigoroso e metucioso. De facto, o elevado amortecimento proporcionado pelos materiais viscoelásticos, a heterogeneidade inerente do material e a dificuldade na obtenção de uma montagem experimental idêntica ao modelo teórico hipoteticamente considerado, constituem as principais dificuldades na obtenção de um sistema capaz de caracterizar convenientemente as propriedades de materiais viscoelásticos com elevado amortecimento material.

Todavia, dispor de um sistema de medição do módulo complexo do material é crucial, uma vez que as propriedades normalmente disponibilizadas pelo fabricante, para além de serem obtidas numa amostragem esporádica de toda a produção, são muitas das vezes obtidas por um processo de medição aproximado. Assim, possuir a capacidade de medir *in loco* as propriedades do material aplicado e conhecer o processo de medição aplicado, suas variáveis e respectiva sensibilidade, torna-se essencial num procedimento de simulação e projecto de tratamentos viscoelásticos.

O módulo complexo é, normalmente, medido através de um ensaio dinâmico em que um provete viscoelástico é deformado ciclicamente, através de um carregamento do tipo harmónico, sendo medidos simultaneamente a carga aplicada e a deformação imposta ao provete. Assim, quando é aplicado ao provete um carregamento harmónico,  $f(t) = Fe^{j\omega t}$ , a resposta em regime estacionário será também do tipo harmónico,  $x(t) = Xe^{j(\omega t - \delta)}$ , com a mesma frequência  $\omega$  da excitação, apresentando no entanto um desfasamento relativo  $\delta$ .

A configuração do provete e a forma de carregamento poderão ser escolhidos de forma a impor no material viscoelástico uma deformação extensional ou uma deformação de corte, conseguindo-se assim determinar directamente o módulo extensional ou o módulo de corte complexos, respectivamente.

O provete de ensaio pode assumir diversas configurações, desde um simples bloco de material viscoelástico associado a um bloco rígido de massa conhecida, constituindo um hipotético sistema com um grau de liberdade, até sistemas mais complexos, como, por exemplo, as vigas e

placas com tratamento onde a camada de material viscoelástico é caracterizada através da perturbação causada no sistema original.

Os ensaios são realizados em ambiente de temperatura controlada, dada a elevada dependência das propriedades dos materiais viscoelásticos com a mesma. Normalmente, a temperatura da câmara de ensaio pode variar numa larga escala de temperatura, de forma a recorrer ao princípio da correspondência frequência-temperatura para, por um lado correlacionar e validar medições efectuadas a diferentes temperaturas e, por outro, maximizar a gama de frequência e de temperatura da medição.

### 3.1. Sistema discreto com um grau de liberdade

O sistema com um grau de liberdade, onde o bloco ou camadas de material viscoelástico representam a rigidez do sistema, é caracterizado, por um lado, pela simplicidade associada ao tratamento matemático do modelo analítico e dos dados medidos e, por outro, pela dificuldade inerente à obtenção de uma montagem experimental eficiente.

#### 3.1.1. Configuração do sistema de medição

No sistema com um grau de liberdade, o material viscoelástico assume a função de mola-amortecedor enquanto que um bloco rígido de massa conhecida  $M$  constitui a massa concentrada.

O sistema pode ser configurado de forma a deformar o material viscoelástico em corte (Figura 1a) ou em compressão-extensão (Figura 1b).

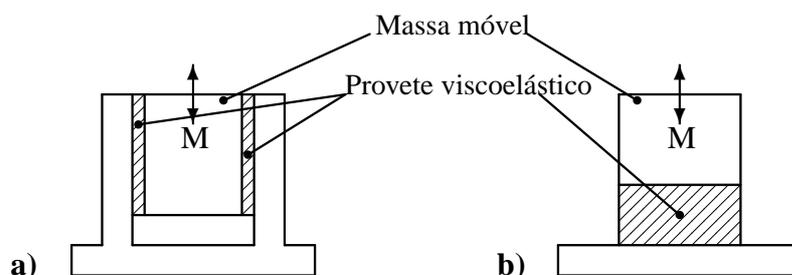


Figura 1. Sistema com 1 grau de liberdade

A rigidez complexa equivalente é calculada em função dos parâmetros dimensionais do provete de material viscoelástico e do seu módulo complexo, na forma:

- provete em corte:

$$\bar{K} = \bar{G} \frac{A_C}{h} \quad (4)$$

- $\bar{G}$ : módulo complexo de corte do material viscoelástico
- $A_C$ : área transversal do provete
- $h$ : espessura do provete
- provete em extensão-compressão:

$$\bar{K} = \bar{E} \frac{A_E}{L} \quad (5)$$

- $\bar{E}$ : módulo complexo extensional do material viscoelástico
- $A_E$ : área transversal do provete
- $L$ : comprimento do provete em extensão

### 3.1.2. Medição da transmissibilidade do sistema

Uma das formas mais vulgares de aplicação do modelo com um grau de liberdade na medição do módulo complexo de materiais viscoelásticos reside na análise da função de transmissibilidade do sistema colocado sobre uma base móvel (Figura 2), à qual é imposto um movimento harmónico [4].

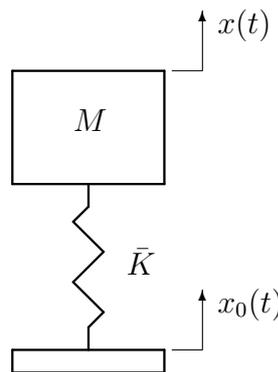


Figura 2. Sistema com um grau de liberdade - medição da transmissibilidade

A equação de movimento do sistema de um grau de liberdade com base móvel é descrita por:

$$M\ddot{x}(t) + \bar{K}[x(t) - x_0(t)] = 0 \quad (6)$$

Como o movimento da base móvel é do tipo harmónico,  $x_0(t) = X_0 e^{j\omega t}$ , a massa concentrada  $M$  descreve um movimento igualmente harmónico com a mesma frequência, todavia desfasado da oscilação da base em resultado do amortecimento viscoelástico, do tipo  $x(t) = \bar{X} e^{j\omega t}$ .

Assim, a equação de movimento do sistema pode ser reescrita na forma:

$$[-\omega^2 M + \bar{K}] \bar{X} = \bar{K} X_0 \quad (7)$$

A transmissibilidade absoluta do sistema pode então ser calculada pela equação:

$$T = \frac{\bar{X}}{X_0} = \frac{\bar{K}}{-\omega^2 M + \bar{K}} \quad (8)$$

Resolvendo a equação anterior em ordem a  $\bar{K}$ , obtemos a equação que permite calcular a distribuição da rigidez complexa com a frequência na forma:

$$\bar{K}(\omega) = \omega^2 M \left[ \frac{T}{T-1} \right] \quad (9)$$

Aplicando a Equação (4) ou (5) obtemos a distribuição do módulo de corte ou extensional complexo.

A determinação da rigidez complexa a partir da inversa da função de transmissibilidade absoluta apresenta uma formulação mais simples, sendo esta função facilmente obtida, quer directamente num analisador espectral, quer usando um algoritmo de cálculo complexo. Assim, a inversa da transmissibilidade é definida por:

$$T^{-1} = \frac{\bar{K} - \omega^2 M}{\bar{K}} \quad (10)$$

donde se obtém o valor de  $\bar{K}(\omega)$  na forma:

$$\bar{K}(\omega) = \frac{\omega^2 M}{1 - T^{-1}} \quad (11)$$

A simples colocação de um bloco móvel entre dois apoios fixos à base móvel, conforme ilustrado na Figura 1a, colocando entre eles duas camadas de material viscoelástico, não permite obter facilmente um sistema com um único grau de liberdade. De facto, a montagem experimental efectuada com base nesta configuração não restringe o movimento associado à rotação do bloco em torno do eixo transversal do sistema. Esta liberdade de rotação associada ao elevado amortecimento do sistema, fornecido pelas camadas de material viscoelástico que realizam a ligação entre o bloco móvel e a base do sistema, não permitem obter uma função de transmissibilidade associada unicamente ao grau de liberdade pretendido (translação). Torna-se assim importante restringir este movimento espúrio de rotação.

Essa restrição pode ser imposta pelo uso de um conjunto de provetes viscoelásticos dispostos conforme ilustrado na Figura 3, o que, se por um lado permite um melhor guiamento da massa móvel, por outro pode aumentar o número de graus de liberdade em resultado da heterogeneidade do material, ou seja, em vez de obtermos uma rigidez equivalente homogénea poderemos obter vários elementos de rigidez diferente, tantos quantos os provetes viscoelástico aplicados como forma de guiamento.

A aplicação de um guiamento físico, como, por exemplo, um guiamento pressurizado [6], deve ser criteriosamente analisada dada a possibilidade de introduzir no sistema fontes de erro desconhecidas (amortecimento viscoso e rigidez de um guiamento lubrificado, rigidez de um guiamento elástico, etc).

### 3.1.3. Medição da resposta do sistema

Neste método de caracterização, também designado na literatura por método de impedância, a caracterização do material viscoelástico é realizada através da determinação da rigidez complexa da mola do sistema teórico com um grau de liberdade (Figura 4).

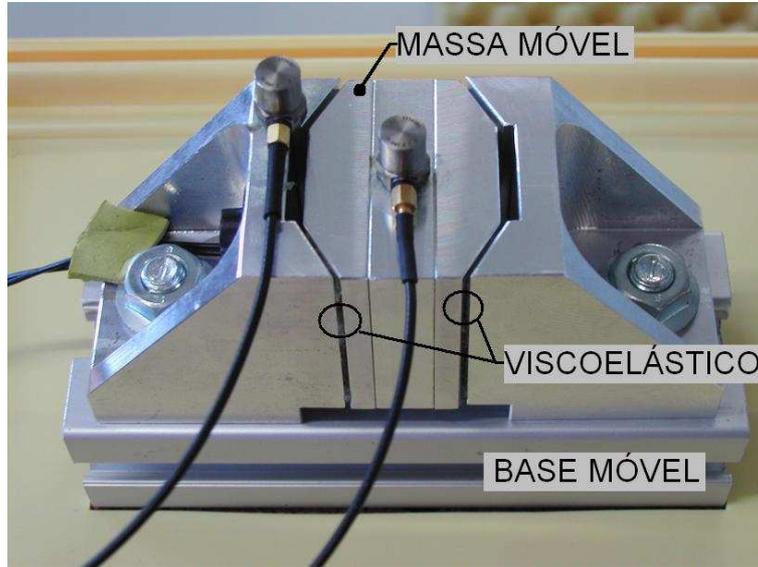


Figura 3. Montagem experimental para medição da transmissibilidade do sistema com um grau de liberdade

A equação de movimento do sistema com um grau de liberdade é definida como:

$$M\ddot{x}(t) + \bar{K}x(t) = f(t) \quad (12)$$

Considerando que o carregamento imposto é harmónico,  $f(t) = Fe^{j\omega t}$ , a resposta do sistema será também harmónica do tipo  $x(t) = \bar{X}e^{j\omega t}$ , sendo possível reescrever a equação de movimento do sistema na forma:

$$[-\omega^2 M + \bar{K}]\bar{X} = F \quad (13)$$

A função de resposta em frequência, e a sua inversa, pode então ser determinada na forma:

• Receptância, $\alpha$	• Rigidez dinâmica, $\alpha^{-1}$
$\alpha = \frac{\bar{X}}{F} = \frac{1}{-\omega^2 M + \bar{K}}$	$\alpha^{-1} = \frac{F}{\bar{X}} = -\omega^2 M + \bar{K} \quad (14a)$

• Mobilidade, $Y$	• Impedância, $Y^{-1}$
$Y = \frac{\dot{\bar{X}}}{F} = \frac{j\omega}{-\omega^2 M + \bar{K}}$	$Y^{-1} = \frac{F}{\dot{\bar{X}}} = \frac{-\omega^2 M + \bar{K}}{j\omega} \quad (14b)$

• Acelerância, $A$	• Inertância, $A^{-1}$
$A = \frac{\ddot{\bar{X}}}{F} = \frac{-\omega^2}{-\omega^2 M + \bar{K}}$	$A^{-1} = \frac{F}{\ddot{\bar{X}}} = \frac{-\omega^2 M + \bar{K}}{-\omega^2} \quad (14c)$

A determinação da rigidez complexa,  $\bar{K}$ , que permite caracterizar o módulo de corte complexo do material viscoelástico, torna-se relativamente mais simples utilizando directamente a inversa da função de resposta em frequência (rigidez dinâmica, impedância e inertância). Desta forma, é possível determinar a rigidez complexa a partir da inversa da função de resposta em frequência

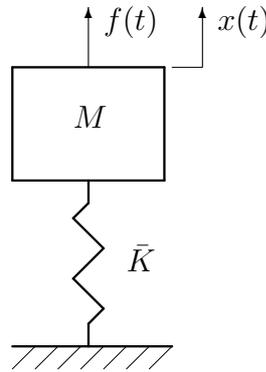


Figura 4. Sistema com um grau de liberdade - medição da resposta

através das seguintes equações:

- Rigidez dinâmica,  $(K, \eta) = f(\alpha^{-1})$   
 $\bar{K} = \omega^2 M + \alpha^{-1}$  (15a)

- Impedância,  $(K, \eta) = f(Y^{-1})$   
 $\bar{K} = \omega^2 M + j\omega Y^{-1}$  (15b)

- Inertância,  $(K, \eta) = f(A^{-1})$   
 $\bar{K} = \omega^2 M - \omega^2 A^{-1}$  (15c)

Tal como no caso da metodologia de caracterização baseada na análise da transmissibilidade do sistema com um grau de liberdade, é necessário introduzir na montagem experimental um meio de restrição do movimento de rotação, de forma a obter unicamente o grau de liberdade considerado no modelo analítico (translação).

Allen [7] utiliza um sistema com um grau de liberdade, teoricamente representado pela Figura 1a, onde o guiamento é proporcionado pelo núcleo móvel do próprio excitador.

A ligação entre a massa móvel do sistema e o eixo móvel do excitador é realizada por um bloco rígido de material cerâmico, de forma a evitar a condução térmica.

Kergourlay e Balmès [8] impõem o guiamento através da adopção de provetes sandwich, com uma geometria específica, que permitem restringir os movimentos extra da massa móvel. Todavia, esta solução apresenta alguns inconvenientes, nomeadamente a presença de um modo natural espúrio cuja frequência se situa na gama de análise, a necessidade de utilização de provetes específicos que necessitam de ser propositadamente maquinados e a grande dimensão da montagem experimental.

#### 4. MONTAGEM EXPERIMENTAL PROPOSTA

Face à dificuldade encontrada no desenvolvimento de um sistema de caracterização baseado na medição da transmissibilidade, sendo a montagem ilustrada na Figura 3 uma dessas tentativas, optou-se por desenvolver um sistema de caracterização baseado na medição da resposta em frequência, introduzindo na montagem experimental um mecanismo de guiamento da massa móvel.

A Figura 5 ilustra a montagem concebida. É constituída por uma base fixa, que é rigidamente ligada ao corpo do excitador electrodinâmico através de uma mesa de elevada rigidez, e uma barra móvel que é excitada pelo excitador electromagnético através de uma haste flexível (realizada com cordão de aço com 1.5mm de diâmetro e 35mm de comprimento). A excitação aplicada ao sistema é medida através de uma célula de carga Brüel&Kjær 8200 (3.88pC/N) e a resposta por um acelerómetro Brüel&Kjær 4371 (1.008pC/ms<sup>-2</sup>), determinando-se desta forma a função acelerância.

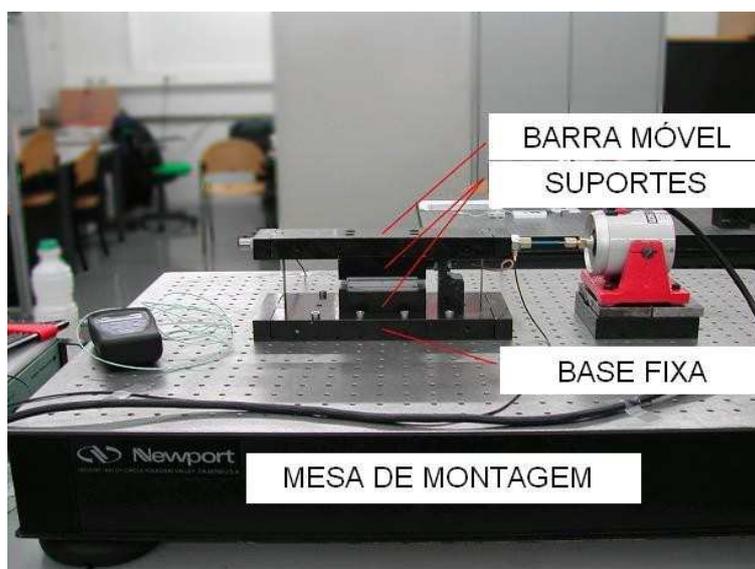


Figura 5. Montagem experimental para medição da transmissibilidade do sistema com um grau de liberdade

A mesa de suporte é apoiada sobre quatro apoios pneumáticos, o que introduz modos de corpo rígido de baixa frequência no sistema. O guiamento da barra móvel é conseguido através de duas molas laterais em forma de lâmina, com uma rigidez transversal equivalente muito baixa ( $\approx 2800$  N/m) relativamente ao módulo de ganho do material em análise. De forma a retirar o efeito desses modos de corpo rígido, bem como obter uma medição mais fidedigna na zona das baixas frequências, é utilizado um sensor de proximidade Philips PR 6423 (8.7705E3V/m), rigidamente ligado à placa base, para medir o deslocamento relativo.

O filme de material viscoelástico em análise é colocado entre duas placas de suporte em alumínio rectificadas, que são ligadas respectivamente à placa base e à barra móvel através de dois blocos



Figura 6. Porta-provete e provete viscoelástico

de ligação (Figura 6).

#### 4.1. Calibração da cadeia de medição

A caracterização do módulo complexo do material viscoelástico em análise é obtida através da função de resposta em frequência medida no sistema, pelo que é essencial que a cadeia de medição esteja correctamente calibrada, determinando as sensibilidades correctas dos transdutores envolvidos.

O par célula de carga e acelerómetro foi calibrado através da resposta de um bloco cilíndrico rígido com uma massa conhecida de 9.780Kg (a massa total em teste, 9.7932Kg, corresponde à massa do bloco, adicionada à massa do acelerómetro, 11g, e à massa móvel da célula de carga, 2.2g).

A sensibilidade do sensor de deslocamento é fortemente dependente do material do alvo, neste caso, do material do bloco de apoio do porta provete. Assim, optou-se por calibrar o sensor directamente na montagem experimental, usando como referência o acelerómetro previamente calibrado de acordo com o procedimento apresentado anteriormente.

#### 4.2. Selecção do suporte do sistema

A representatividade da montagem experimental ao modelo analítico considerado, um sistema com um grau de liberdade correspondente à translação relativa entre a barra móvel e a placa base, exige que a ligação entre o excitador e a placa base apresente uma elevada rigidez e que não possua ressonâncias dentro da gama de frequências usada no processo de caracterização do material.

Verificou-se que a mesa de montagens usada no sistema original (Figura 5), apesar de possuir uma elevada rigidez de flexão, apresenta duas frequências de ressonância, associadas ao núcleo da mesa, dentro da gama de frequências da análise.

De forma a solucionar esta falha optou-se pela utilização de um bloco rígido de betão, cuja primeira frequência natural se situa fora da gama de análise considerada, [0-400Hz], como ilustrado na Figura 7.

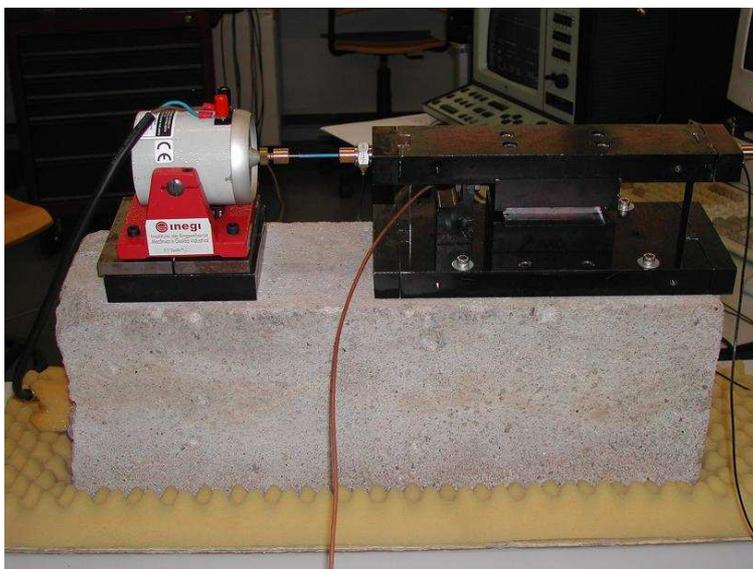


Figura 7. Bloco de suporte seleccionado

## 5. RESULTADOS OBTIDOS

As Figuras 8 e 9 representam as funções de resposta em frequência, receptância e aceleração, obtidas através do sensor de deslocamento relativo e do acelerómetro, respectivamente, para uma temperatura ambiente de 17.5°C.

Como seria de esperar, e é evidente na representação da função aceleração representada sob a forma de função receptância na Figura 9a), o sinal medido no acelerómetro contém os modos de corpo rígido da montagem experimental, pelo que nesta gama de frequências a função aceleração não poderá ser utilizada no processo de caracterização do material viscoelástico. Em contrapartida, o sensor de proximidade, por medir o deslocamento relativo entre a barra móvel e a placa base, é imune aos modos de corpo rígido do conjunto, permitindo a aplicação da função receptância na caracterização do material para a gama de baixas frequências. Na zona das altas frequências, a relação sinal/ruído do sensor de deslocamento é muito reduzida (Figura 9b), sendo preferível, nesta gama, aplicar a função aceleração no processo de caracterização. A Figura 10 apresenta a sobreposição dos resultados obtidos, quer através da medição da função receptância (pontos verdes) quer através da medição da função aceleração (pontos azuis), ao nomograma [10] fornecido pelo fabricante do material viscoelástico analisado.

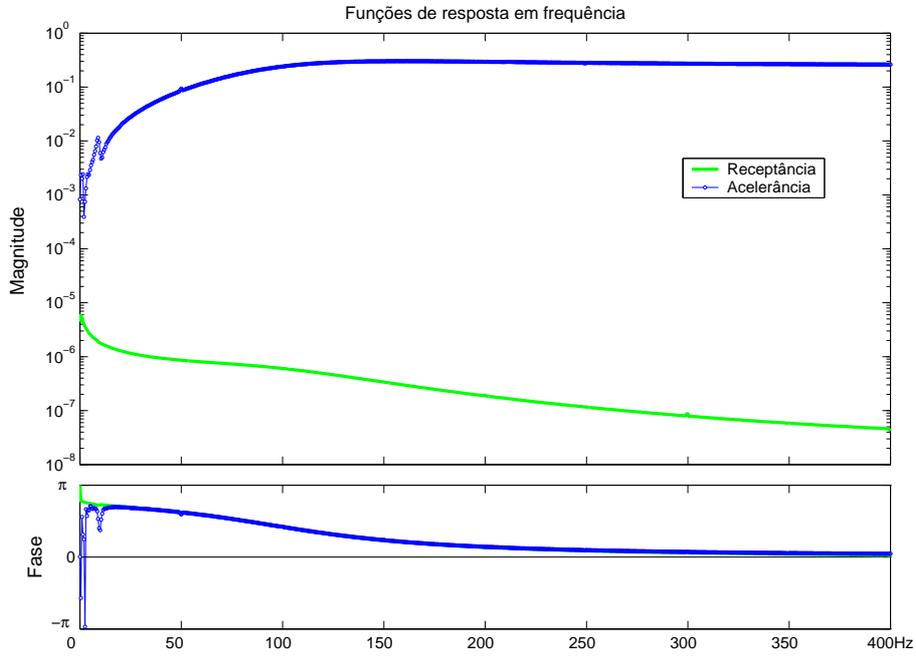


Figura 8. Funções de resposta em frequência medidas - Magnitude e fase

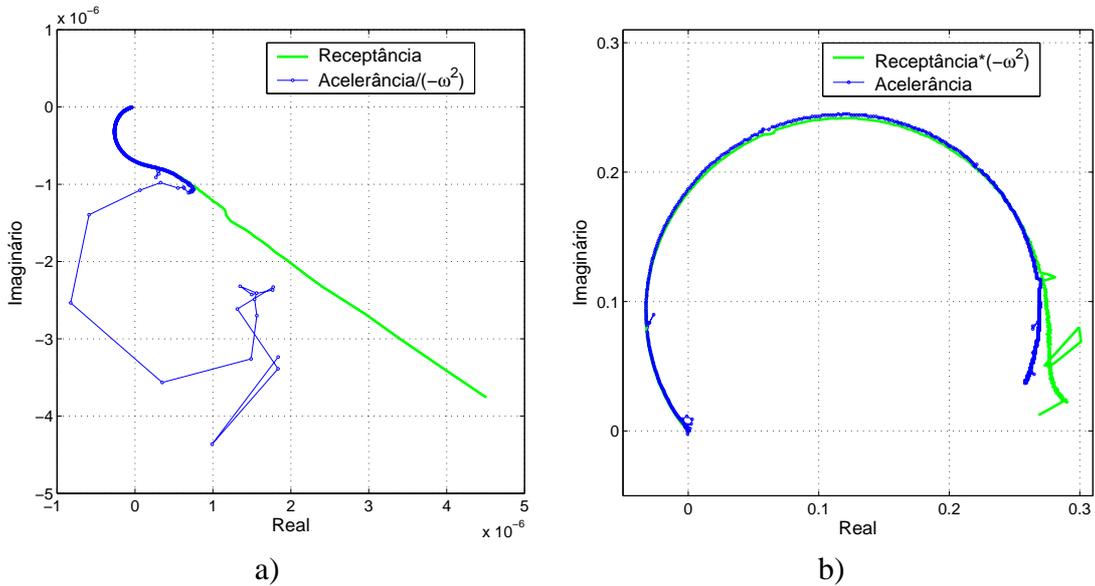


Figura 9. Funções de resposta em frequência medidas - Diagrama de Nyquist

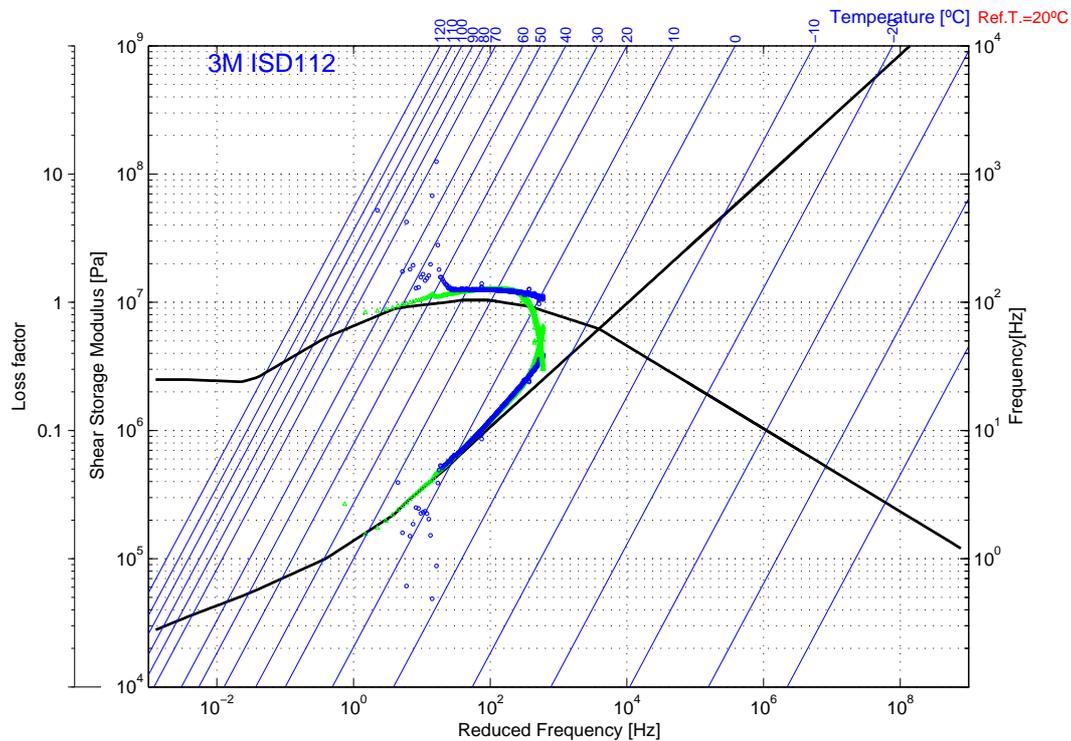


Figura 10. Comparação dos resultados obtidos

Como se pode verificar na Figura 10, o procedimento de caracterização proposto permite obter uma boa aproximação ao nomograma original do fabricante, sendo ainda evidente a representatividade do cálculo baseado na função receptância e na função acelerância, na zona das baixas e das altas frequências, respectivamente.

## 6. CONCLUSÃO

O sistema discreto com um grau de liberdade permite utilizar uma descrição muito simples do modelo teórico, o que facilita a extracção dos valores do módulo complexo do material a partir das medições efectuadas.

No entanto, a obtenção do modelo teórico na montagem experimental não é simples, sendo necessário recorrer a artifícios, como sistemas de guiamento, condições de fronteira livre ou bases de apoio muito rígidas, para obter uma aproximação razoável ao modelo teórico.

Apesar da dificuldade inerente à montagem experimental, este método de caracterização, recorrendo quer à medição da resposta quer à medição da transmissibilidade do sistema, é amplamente aplicado na determinação experimental de um amplo conjunto de materiais viscoelásticos, desde fibras finas viscoelásticas [6] a espumas poliméricas rígidas [9].

A montagem experimental proposta permite representar com uma boa aproximação um sistema com um grau de liberdade, sendo a gama de análise limitada superiormente pelas ressonâncias

do bloco de suporte.

Para obter uma forma de imunidade aos modos de corpo rígido da montagem, utiliza-se um transdutor de deslocamento relativo, que permite, assim, caracterizar o material para a zona das baixas frequências. Na zona das altas frequência, deve optar-se pelo procedimento de caracterização baseado na função aceleração.

O método de caracterização apresentado e aplicado neste trabalho permite obter facilmente o módulo de corte complexo de materiais viscoelásticos na gama de frequências compreendida entre 0 e 400Hz, sendo possível, devido à sua reduzida dimensão, colocar o sistema de medição numa câmara com temperatura controlada e aplicar o princípio da correspondência frequência-temperatura [4] para caracterizar o módulo complexo para gamas diferentes de temperatura e de frequência.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à 3M o fornecimento dos tratamentos viscoelásticos utilizados neste estudo.

## REFERÊNCIAS

- [1] R. Moreira and J.D. Rodrigues, Constrained damping layer treatments: the finite element modelling, *Journal of Vibration Control*, paper ref. JVC 039060 (no prelo, a publicar em 2004).
- [2] R. Moreira and J. Rodrigues, Modelização e validação experimental do comportamento dinâmico de placas com tratamento passivo por amortecimento viscoelástico, *Mecânica Experimental, N° 7, Revista da APAET*, 93-101 (2002).
- [3] T.E. Alberts and H. Xia, Design and analysis of fiber enhanced viscoelastic damping polymers, *Journal of Vibration and Acoustics (Special 50th Anniversary Design Issue)*, **117**, 398–404, October (1995).
- [4] D.I.G. Jones, *Handbook of viscoelastic vibration damping*, John Wiley & Sons, 1st edition (2001).
- [5] ASTM, D4092-90 standard terminology relating to dynamic mechanical measurements on plastics, In *Annual Book of ASTM Standards, V. 08.02*, 345–347 (1990).
- [6] B. Stisen and H.J. Bress, Mesure du module complexe d'élasticité de fibres et feuilles minces, In *Brüel & Kjaer Technical Review No.2*, 3–18 (1970).
- [7] B.R. Allen, A direct complex stiffness test system for viscoelastic material properties, In *SPIE 3th Smart Structures and Materials, San Diego, CA, USA*, February (1996).
- [8] G. Kergourlay and E. Balmès, Conception d'un banc de mesure des propriétés de films viscoelastiques, In *IME 2002, Besançon, France*, July (2002).
- [9] T. Pritz, Dynamic young's modulus and loss factor of plastic foams for impact sound isolation, *Journal of Sound and Vibration*, **178**(3):315–322 (1994).
- [10] 3M, *ScotchDamp™ vibration control systems*, 3M Specialties Division, St.Paul, MN, USA (1993).