

COMPORTAMENTO DINÂMICO DE PLACAS COM TRATAMENTO PASSIVO POR AMORTECIMENTO VISCOELÁSTICO

Moreira *, R.S. ; Rodrigues **, J.D.

*Assistente. Dep. Eng. Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

** Professor Auxiliar. Dep. Eng. Mecânica e Gestão Industrial, Fac. de Engenharia da Universidade do Porto.



Resumo

A aplicação de materiais viscoelásticos em estruturas mecânicas leves constitui um meio de controlo dinâmico passivo particularmente eficiente e simples. O material viscoelástico pode ser colocado na estrutura sob a forma de tratamentos superficiais, com ou sem restrição, ou de uma forma integrada no próprio material da estrutura constituindo uma estrutura sandwich.

Neste trabalho apresenta-se um estudo experimental de caracterização e avaliação comparativa dos efeitos de diversas configurações de tratamento viscoelástico superficial sobre o nível de amortecimento globalmente atingido em estruturas de tipo placa.

A análise comparativa é realizada com base nas características dinâmicas dum conjunto de provetes representativos das diversas variantes de tratamento viscoelástico superficial analisadas. As características dinâmicas são identificadas por análise modal experimental.

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de materiais viscoelásticos no tratamento de estruturas mecânicas com reduzido amortecimento estrutural permite introduzir um mecanismo de amortecimento para controlo dinâmico passivo. O amortecimento introduzido permite controlar e, em particular, atenuar efeitos dinâmicos tais como vibração e emissão acústica, e prolongar a vida à fadiga de componentes sujeitos a carregamentos cíclicos ou de impacto.

A inclusão deste mecanismo de

amortecimento no projecto de componentes mecânicos sujeitos a cargas dinâmicas conduz a um dimensionamento mais correcto, ou até mesmo óptimo, eliminando a necessidade de soluções correctivas à posteriori e melhorando o desempenho dos equipamentos a nível do conforto, da segurança e da durabilidade.

A integração de um material com comportamento viscoelástico na estrutura permite introduzir um mecanismo eficiente de dissipação no processo de transferência de energia da vibração. Os tratamentos superficiais com camada viscoelástica podem ser aplicados segundo duas

configurações distintas: com restrição e sem restrição (Johnson, 1995; Nashif, *et al.*, 1985).

Na configuração de tratamento superficial sem restrição, a camada de material viscoelástico é directamente aplicada sobre a superfície da placa (figura 1).

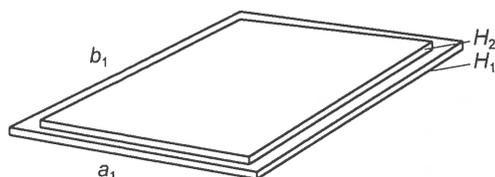


Figura 1 - Provete com tratamento superficial sem restrição.

A vibração da placa, que normalmente é composta por modos naturais de flexão e/ou torção, provoca a deformação cíclica em flexão da camada viscoelástica. Desta forma, parte da energia de vibração que é transferida para a camada viscoelástica como energia de deformação é dissipada para o exterior sob a forma de calor pelo mecanismo dissipador deste material (Nashif, *et al.*, 1985). Esta configuração apresenta como principais vantagens a simplicidade na preparação do tratamento e na sua aplicação. No entanto, nesta configuração a eficiência do mecanismo dissipativo varia acentuadamente com a espessura da camada viscoelástica (Nashif, *et al.*, 1985), conduzindo, por vezes, à aplicação de camadas viscoelásticas espessas que aumentam consideravelmente a massa global da estrutura.

A configuração de tratamento superficial com camada de restrição é conseguida pela colocação de uma camada viscoelástica muito fina entre a placa a tratar e uma camada elástica de restrição (figura 2).

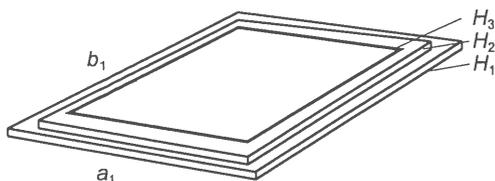


Figura 2 - Provete com tratamento superficial com restrição.

Nesta configuração, o efeito combinado da rigidez extensional da camada de restrição e do campo de deformações da placa base conduz a que a camada de material viscoelástico seja fundamentalmente deformada em corte (Nashif, *et al.*, 1985), permitindo a transferência para a camada de material viscoelástico de uma elevada energia de deformação, mesmo para reduzidas espessuras da camada viscoelástica (Jones, 1988). Esta configuração permite introduzir um mecanismo dissipativo muito eficiente sem conduzir a alterações significativas, quer dimensionais, como a espessura total, quer estruturais, como a massa e a rigidez.

A aplicação deste tipo de tratamento reveste-se ainda de grande simplicidade. No entanto, como a camada de material viscoelástico se encontra ligada a uma camada elástica de restrição, a preparação deste tratamento apresenta-se como sendo mais elaborada que a do tratamento sem restrição.

MODELAÇÃO DOS MATERIAIS VISCOELÁSTICOS

O amortecimento viscoelástico é fortemente exibido em materiais poliméricos, constituindo um mecanismo de amortecimento interno com muitas possibilidades de aplicação industrial. Os materiais poliméricos são constituídos por longas cadeias moleculares, onde os átomos de carbono formam fortes ligações, possibilitando a formação de ramificações mais ou menos fortes, dependendo da composição e processamento do material (Nashif, *et al.*, 1985; Ungar, 1992). O amortecimento é obtido pelo processo de relaxação e recuperação da cadeia ramificada do polímero após deformação, permitindo assim converter a energia mecânica da vibração em calor que é dissipado para o exterior (Johnson, 1995). A capacidade dissipativa encontra-se intimamente ligada à capacidade de armazenamento de energia de deformação dentro do material viscoelástico.

A caracterização do material viscoelástico no domínio da frequência permite ultrapassar a complexidade da formulação matemática das leis reológicas no domínio do tempo (Moreira, 1996), permitindo assim definir a relação tensão-deformação através do módulo extensional complexo:

$$\sigma(\omega) = E^*(\omega) \varepsilon(\omega)$$

Num elemento elástico, uma deformação harmónica provoca uma tensão síncrona em fase com a deformação. A mesma solitação harmónica, aplicada a um elemento viscoso origina uma tensão síncrona em quadratura com a deformação.

Desta forma, o comportamento dos materiais viscoelásticos situa-se numa situação intermédia, o que permite explicar a natureza complexa do módulo extensional que resulta da relação tensão - deformação no domínio da frequência (figura 3).

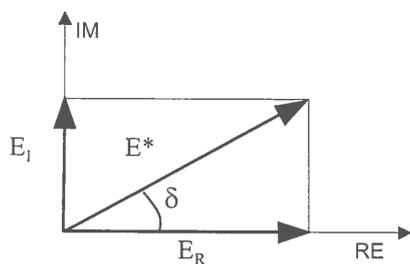


Figura 3 - Representação do módulo complexo

A aplicação do módulo complexo na descrição do comportamento do material simplifica o tratamento do modelo no domínio da frequência. Definidas as funções, no domínio da frequência, das componentes real e imaginária do módulo complexo, pode caracterizar-se o material viscoelástico utilizando directamente os dados experimentais obtidos no domínio da frequência (Nashif, *et al.*, 1985).

Módulo extensional complexo

O módulo extensional E^* do material é definido pelo quociente entre o fasor tensão

e o fasor deformação, e pode ser escrito como:

$$E^* = E_R + jE_I = E_R(1 + j\eta)$$

onde E_R representa a parte real do módulo extensional, denominado por módulo de ganho, e E_I , denominado por módulo de perda, representa a componente imaginária.

A componente real representa a quantidade de energia que é acumulada no material, sendo esta completamente recuperável, enquanto que a componente imaginária do módulo representa a energia que é dissipada para o exterior sob a forma de calor.

Factor de perda

O factor de perda η do material é definido pelo quociente entre a componente imaginária e a componente real do módulo complexo:

$$\eta = \frac{E_I}{E_R}$$

Assim, o factor de perda representa o desfaseamento entre a tensão imposta e a deformação induzida, sendo $\eta = \text{tg} \delta$ (figura 3).

Em regime harmónico, o factor de perda representa, fisicamente, a razão entre a energia dissipada por radiano e a energia armazenada por ciclo (Qinghui *et al.*, 1985).

ESTUDO EXPERIMENTAL

Neste estudo experimental caracteriza-se a eficiência do mecanismo dissipativo introduzido pela camada de material viscoelástico nas configurações sem restrição e com restrição.

A análise (Moreira, 1996) foi realizada com base em provetes constituídos por placas rectangulares de alumínio de espessura de 2 mm. Os provetes analisados

distribuem-se em três grupos. Um dos grupos é formado apenas por um provete, A1, constituído por uma placa sem qualquer tipo de tratamento que serve como referência para avaliar a eficiência e as alterações estruturais dos tratamentos aplicados nos provetes tratados. Estes formam o grupo de provetes B1, B2 e B3 com tratamento superficial sem restrição (figura 1) constituído por uma camada de PVC plasticizado, e o grupo de provetes D1, E1 e F1 com tratamento viscoelástico com restrição (figura 2) de referência 3M SJ 2052, constituído por um filme de 3M ISD 112 e por uma camada de restrição em alumínio.

As características dimensionais dos provetes e a espessura H_2 e H_3 das camadas de material viscoelástico e das camadas de restrição, respectivamente, estão apresentadas na tabela 1, e todos os tratamentos podem ser considerados como tratamentos totais, isto é, que abrangem a totalidade da área superficial da placa.

A caracterização dinâmica dos provetes foi realizada por análise modal experimental. Dado o carácter discreto do método de análise, os provetes foram discretizados segundo uma malha de medição constituída por 25 pontos (figura 4), e definida após uma análise preliminar das formas naturais de vibração. De forma a simular condições de fronteira próximas da situação de bordo livre, os provetes foram suspensos por elásticos, como se representa na figura 5.

No teste dinâmico dos provetes e como

Tabela 1 - Dados dos provetes do estudo experimental

Provete	Dimensões $b_1 \times a_1$ [mm]	Tratamento	Espessura $H_1/H_2/H_3$ [mm]	Varição relativa de massa [%]
A1	298x198	não tratado	2 / - / -	--
B1	297x198	sem restrição	2 / 0.6 / -	8.60
B2	298x198	sem restrição	2 / 1.2 / -	16.80
B3	298x198	sem restrição	2 / 3.3 / -	49.19
D1	298x197	com restrição	2/ 0.250 / 0.30	15.68
E1	298x197	com restrição	2/ 0.125 / 0.25	12.94
F1	297x197	com restrição	2/ 0.125 / 0.20	11.00

meio de excitação utilizou-se um martelo de impacto instrumentado *Brüel & Kjær* 8202, excitando a placa em todos os pontos da malha de análise. A resposta da placa à excitação aplicada mediu-se, sob a forma da aceleração linear, no ponto 17, que funciona como referência para a análise, através de um acelerómetro piezoeléctrico *Brüel & Kjær* 4393.

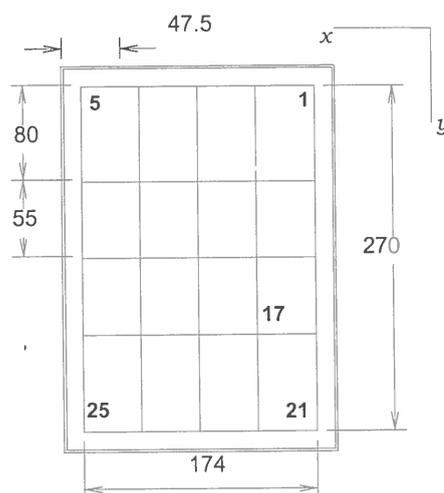


Figura 4 - Malha de medição

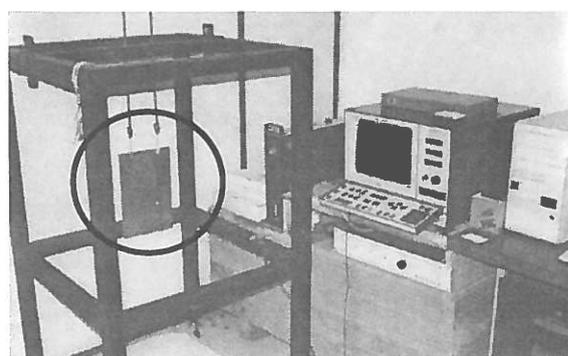


Figura 5 - Montagem experimental

O tratamento dos sinais dinâmicos de excitação e de resposta e a determinação das respectivas 25 funções de resposta em frequência necessárias à identificação modal processaram-se no analisador dinâmico de sinal *Brüel & Kjær 2235*.

A partir das funções de resposta em frequência dos provetes com as diferentes variantes de tratamento procedeu-se à identificação dos parâmetros modais utilizando o programa de identificação modal *LMS CADA-PC*.

Com base nos parâmetros modais identificados por análise modal experimental, frequências naturais, taxas de amortecimento modal e formas naturais de vibração, foi realizada uma análise comparativa sobre os efeitos de cada um dos tratamentos nas características dinâmicas das placas, nomeadamente sobre o amortecimento, que representa uma medida da capacidade dissipativa introduzida, e na variação das frequências naturais, que representa a variação atingida em termos de massa e rigidez do conjunto.

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

As figuras 6-8 representam três das funções de resposta em frequência directas, H_{17_17} , obtidas, respectivamente, no provete A1 não tratado, no provete B3 com tratamento superficial sem restrição, e no provete D1 com tratamento superficial com restrição.

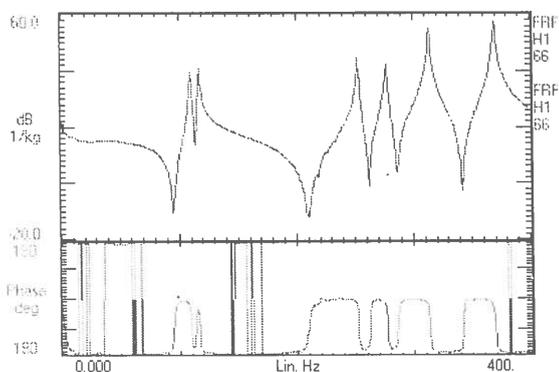


Figura 6 - Função de resposta em frequência directa do provete A1, H_{17_17}

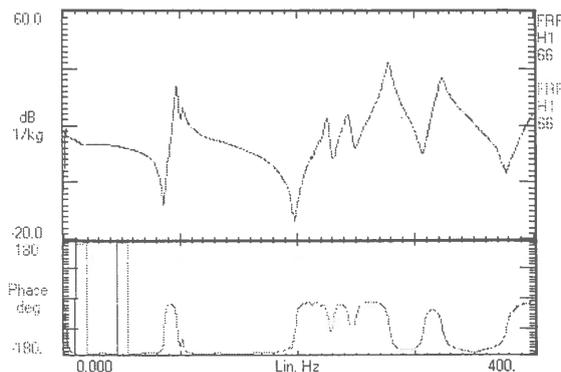


Figura 7 - Função de resposta em frequência directa do provete B3, H_{17_17} .

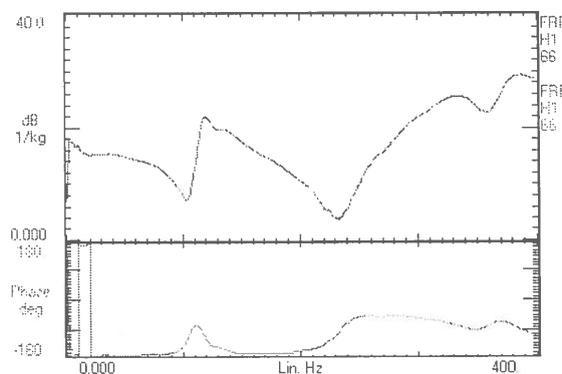


Figura 8 - Função de resposta em frequência directa do provete D1, H_{17_17} .

A forma destas funções na vizinhança das frequências de ressonância evidencia de forma clara o efeito dos tratamentos no amortecimento global das placas.

Na banda de frequência considerada na análise, de 0 a 400Hz, foram identificados os primeiros modos naturais de vibração caracterizados pela sua frequência natural (tabela 2), razão de amortecimento modal (tabela 3) e forma modal respectiva (figuras 9-14).

Nesta banda de frequência, o provete não tratado A1 e os provetes com tratamento superficial sem restrição, B1, B2 e B3, possuem seis modos naturais, enquanto que os provetes com tratamento superficial com restrição, D1, E1 e F1, apenas possuem cinco modos naturais de vibração.

Tabela 2 - Frequências naturais [Hz]

<i>Provete</i>	<i>1º Modo</i>	<i>2º Modo</i>	<i>3º Modo</i>	<i>4º Modo</i>	<i>5º Modo</i>	<i>6º Modo</i>
<i>A1</i>	109.345	116.955	252.786	277.304	313.700	369.342
<i>B1</i>	105.269	113.170	244.137	268.351	303.542	358.245
<i>B2</i>	102.047	108.965	236.208	259.336	293.168	345.756
<i>B3</i>	97.177	102.064	226.317	244.071	278.322	323.058
<i>D1</i>	117.378	133.103	268.296	302.772	337.198	n.p.
<i>E1</i>	120.283	134.683	274.033	306.658	344.526	n.p.
<i>F1</i>	117.768	131.983	270.884	303.417	339.503	n.p.

n.p. - não presente

Tabela 3 - Razões de amortecimento [%]

<i>Provete</i>	<i>1º Modo</i>	<i>2º Modo</i>	<i>3º Modo</i>	<i>4º Modo</i>	<i>5º Modo</i>	<i>6º Modo</i>
<i>A1</i>	0.50	0.50	0.22	0.24	0.20	0.20
<i>B1</i>	0.57	0.58	0.29	0.32	0.27	0.28
<i>B2</i>	0.68	0.71	0.41	0.53	0.43	0.44
<i>B3</i>	0.91	1.01	0.81	1.01	0.83	1.01
<i>D1</i>	5.17	5.89	5.05	4.44	4.19	n.p.
<i>E1</i>	3.34	3.11	3.31	2.68	3.53	n.p.
<i>F1</i>	2.93	2.50	2.77	2.03	2.82	n.p.

n.p. - não presente

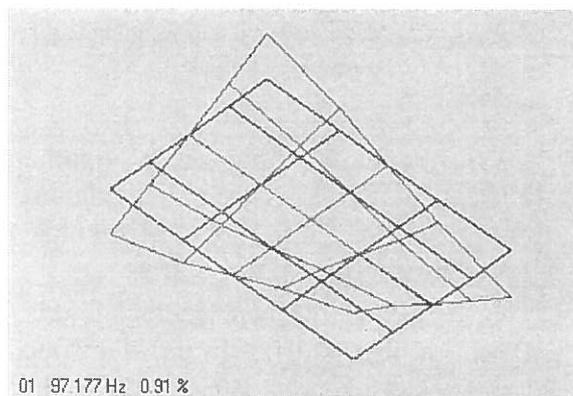


Figura 9 - 1º modo natural do provete B3

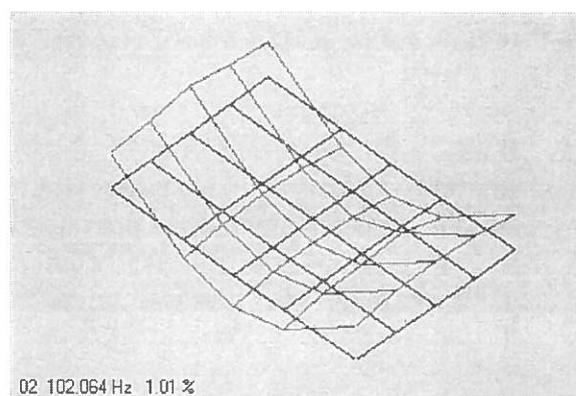


Figura 10 - 2º modo natural do provete B3

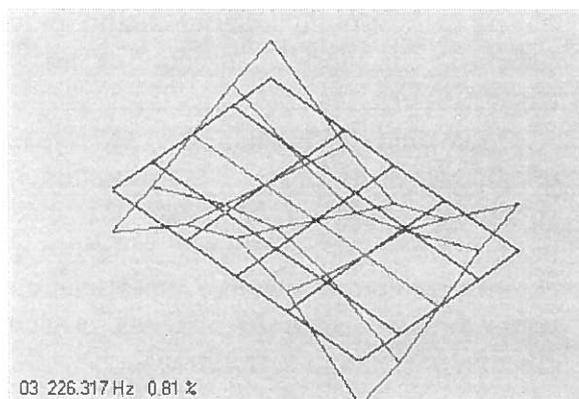


Figura 11 - 3º modo natural do provete B3

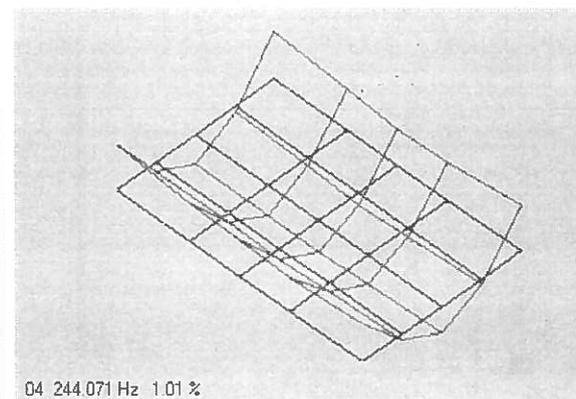


Figura 12 - 4º modo natural do provete B3

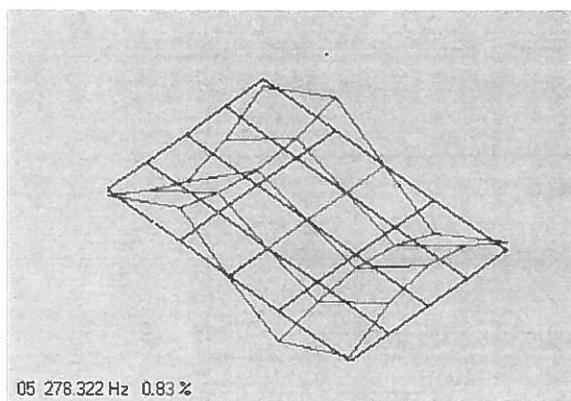


Figura 13 - 5º modo natural do provete B3

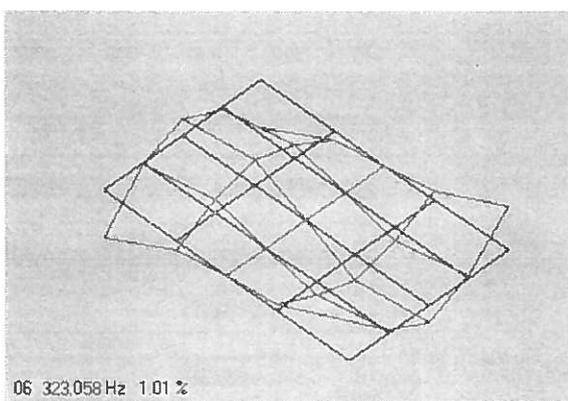


Figura 14 - 6º modo natural do provete B3

Tratamento superficial sem restrição

Os resultados obtidos verificam a existência de uma relação directa entre a eficiência destes tratamentos e a sua espessura (figura 16), evidenciando a necessidade de aplicar tratamentos espessos em relação à espessura da placa base, de forma a justificar a sua aplicação.

No entanto, tratamentos espessos conduzem a um aumento considerável de massa associado a um aumento insignificante de rigidez, dado que o módulo de ganho dos materiais viscoelásticos é relativamente baixo (Nashif, *et al.*, 1985; Jones, 1988). Este efeito manifesta-se na acentuada diminuição verificada nos valores das frequências naturais (figura 15) dos provetes com tratamento sem restrição, atingindo variações mais elevadas à medida que a espessura do tratamento aumenta.

Tratamento superficial com restrição

Para esta configuração de tratamento verifica-se apenas um ligeiro aumento da massa global, e este é devido,

fundamentalmente, à massa da camada elástica de restrição, pois, as camadas de material viscoelástico são de espessura reduzida. Por outro lado, e ao contrário do que se verifica nos tratamentos sem restrição, os tratamentos com restrição tendem a aumentar a rigidez global do conjunto, devido à própria rigidez da camada de restrição, que depende da espessura H_3 , e ao seu acoplamento com a placa base, que é função da espessura H_2 da camada viscoelástica. Este efeito é ilustrado pela variação positiva dos valores das frequências naturais (figura 15) e depende simultaneamente das duas espessuras características do tratamento, ou seja, da espessura da camada de restrição e da espessura da camada viscoelástica. A eficiência deste tipo de tratamentos é muito elevada, como, aliás, os resultados obtidos indicam (figura 16).

Os tratamentos superficiais com material viscoelástico, e em particular na configuração com restrição, constituem, pois, um meio muito eficaz de controlo dinâmico passivo em estruturas leves, e não alteram significativamente a sua espessura, massa e rigidez global (figura 17).

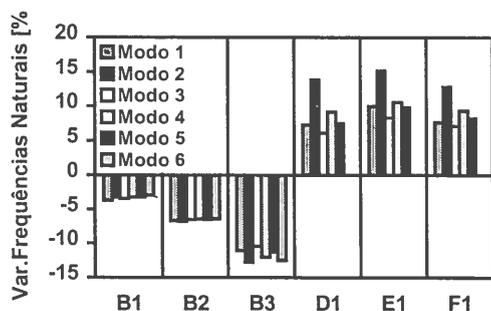


Figura 16 - Variação relativa das frequências naturais.

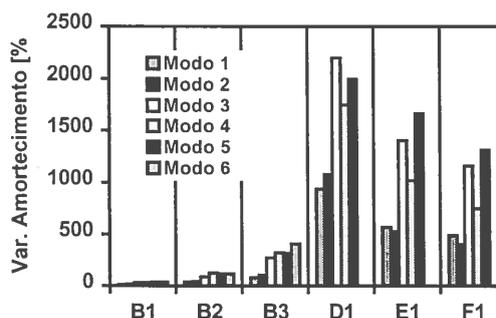


Figura 15 - Variação relativa do amortecimento.

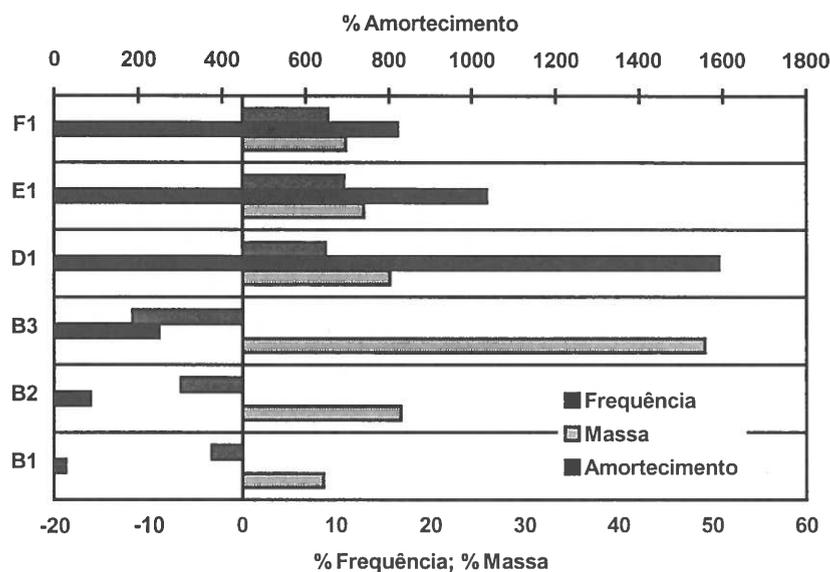


Figura 17 - Análise comparativa dos resultados obtidos nos provetes.

CONCLUSÃO

O tratamento superficial viscoelástico sem restrição constitui uma solução eficiente para a introdução de taxas moderadas de amortecimento e reveste-se de grande simplicidade na preparação e na aplicação do tratamento. No entanto, para a obtenção de taxas de amortecimento elevadas, esta configuração de tratamento conduz à aplicação de camadas muito espessas em relação à espessura da placa base. Este aspecto traduz-se num considerável aumento de massa que modifica o comportamento dinâmico da estrutura através de um abaixamento acentuado das frequências naturais, para além de aumentar a espessura e o peso final da estrutura.

Por outro lado, a configuração com camada de restrição constitui um meio de controlo muito eficiente através da aplicação de tratamentos pouco espessos que não alteram de forma considerável a massa e a espessura da estrutura e que conduzem a elevadas taxas de amortecimento. No entanto, trata-se de uma configuração de tratamento relativamente mais elaborada, quer a nível da sua preparação quer a nível da sua aplicação.

Globalmente, ambas as configurações de tratamento superficial viscoelástico

analisadas, com e sem restrição, constituem um meio eficaz de controlo dinâmico passivo por amortecimento em estruturas do tipo placa.

Nomenclatura

- E* - módulo extensional
- E_R - módulo de ganho
- E_1 - módulo de perda
- H - espessura
- a - largura
- b - comprimento
- δ - $\arctg(\eta)$
- ϵ - deformação
- η - factor de perda
- σ - tensão

Índices

- 1 - placa base
- 2 - camada viscoelástica
- 3 - camada de restrição

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à 3M Laboratories (Europa) GmbH a gentileza do fornecimento dos tratamentos utilizados neste estudo. Agradece-se igualmente o apoio financeiro concedido pela JNICT (Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica).

BIBLIOGRAFIA

- Johnson, C.D., "Design of Passive Damping Systems", Special 50th Anniversary Design Issue, Transactions of the ASME, Vol.117, Junho, 1995, pp.171-176.
- Jones, D.I.G., "Application of Damping Treatments", em Shock and Vibration Handbook, Harris, C.M., (editor), 3^aEdição, C.37,1988)
- Moreira, R.A., "Análise do Comportamento Dinâmico de Placas com Tratamento Passivo por Amortecimento Viscoelástico", Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996.
- Nashif, A.D., Jones, D.I.G., Henderson, J.P., "Vibration Damping", John Wiley & Sons, 1985.
- Qinghui, Z., Yueming, S., Zhongfang, T., Yaodong, C. e Naiyan, L., "Modeling of Viscoelastic Materials and its Application in Dynamic Analysis", Proceedings IMAC 3, Orlando Florida, 1985, pp.1200-1205.
- Ungar, E.E., "Structural Damping", em Noise and Vibration Control Engineering - Principles and Applications, Beranek, L.L., Vér, I.L. (editores), cap.12, 1992.

