

MODELIZAÇÃO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE PLACAS COM TRATAMENTO PASSIVO POR AMORTECIMENTO VISCOELÁSTICO

R. A. Silva Moreira*, J. Dias Rodrigues**

*Secção Autónoma de Engenharia Mecânica - Universidade de Aveiro (SAEM-UA)

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP)



RESUMO

Os tratamentos viscoelásticos superficiais e integrados assumem um papel de relevo nas soluções de tratamento passivo em estruturas flexíveis e leves, nomeadamente em estruturas constituídas por vigas e placas. Associada à sua simplicidade de aplicação, baixo peso e reduzida alteração provocada na estrutura base, a elevada eficiência dos tratamentos viscoelásticos constitui a principal razão do seu sucesso. No entanto, o projecto de tratamentos superficiais com materiais viscoelásticos é complexo. A simulação pelo método dos elementos finitos exige uma correcta discretização da camada viscoelástica e caracterização do material viscoelástico. Neste estudo de modelização e simulação do comportamento dinâmico dos tratamentos viscoelásticos foi utilizado o software de elementos finitos MSC/Nastran. A variação do módulo de ganho e do factor de perda do material viscoelástico com a temperatura e com a frequência foi considerada na modelização. As funções de resposta em frequência foram calculadas directamente a partir do modelo espacial aplicando a solução directa em frequência. A validação da técnica de modelização implementada foi feita ao nível das funções de resposta em frequência de um conjunto de provetes com diferentes configurações de tratamento viscoelástico, superficial com restrição e integrado, para os quais foram medidas as funções de resposta em frequência. O material viscoelástico utilizado tem como referência 3M ISD 112.

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, particularmente eficiente em condições específicas[1,2].

O amortecimento introduzido permite controlar e, em particular, atenuar efeitos

dinâmicos tais como níveis de vibração excessiva e emissão acústica, e prolongar a vida à fadiga de componentes sujeitos a carregamentos cíclicos ou de impacto.

A camada viscoelástica, quando ciclicamente deformada, liberta grandes quantidades de energia de vibração sob a forma de calor.

O material viscoelástico pode ser aplicado na estrutura sob a forma de

tratamentos superficiais, com e sem restrição [3,4,5], ou de uma forma integrada no próprio material constituindo uma estrutura *sandwich* [3,6], figuras 1,2 e 3.

Nos tratamentos integrados e com restrição, a camada viscoelástica é fortemente deformada em corte devido à presença da camada de restrição, no caso do tratamento superficial, ou das placas adjacentes, no caso do tratamento integrado. Devido a este efeito é possível obter tratamentos muito eficientes com camadas dissipativas de muito reduzida espessura, minimizando as alterações de massa e rigidez global da estrutura base [1,3,6].

Os tratamentos superficiais com restrição podem ser colocados de forma parcial e localizada no sentido de reduzir as alterações estruturais, a massa e o custo do tratamento, mantendo, no entanto, um nível de amortecimento muito elevado [5].

Este tipo de tratamento é muito utilizado na indústria aeronáutica e aeroespacial, onde constitui a principal solução no controlo dinâmico de estruturas leves e flexíveis, encontrando-se actualmente em forte expansão para outros campos de aplicação, nomeadamente na indústria automóvel e na construção civil.

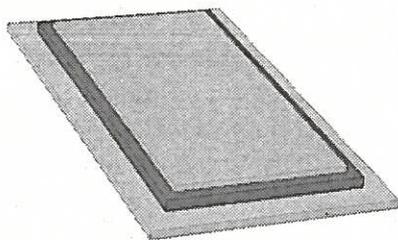


Fig 1 - Tratamento superficial com restrição

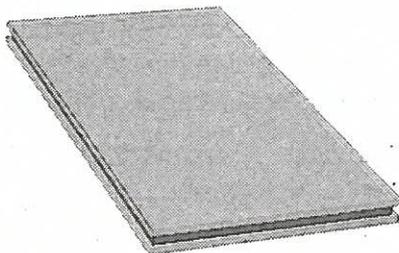


Fig 2 - Tratamento integrado

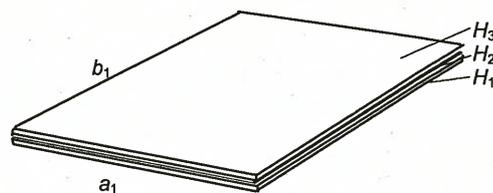


Fig 3 - Configuração de tratamento passivo viscoelástico: superficial e integrado

A consideração deste tipo de tratamentos no projecto de estruturas e na previsão do seu comportamento dinâmico requer ferramentas adequadas de modelização. Com efeito, a modelização dos tratamentos com camadas viscoelásticas deve contemplar, por um lado, o comportamento particular do material viscoelástico, e, por outro, os mecanismos de deformação associados a cada camada.

O método dos elementos finitos assume um papel relevante no conjunto das ferramentas disponíveis para análise e previsão do comportamento dos tratamentos superficiais ou integrados em estruturas complexas.

As propriedades dos materiais viscoelásticos são fortemente dependentes da temperatura e da frequência, sendo necessário incluir essa dependência na simulação pelo método dos elementos finitos.

2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Como foi já referido, o método dos elementos finitos constitui uma ferramenta poderosa de modelização e análise do comportamento dinâmico de estruturas complexas. No entanto, a presença do tratamento viscoelástico exige que o modelo de elementos finitos adoptado seja capaz de descrever correctamente o comportamento da camada viscoelástica e de incluir os efeitos da variação em frequência e com a temperatura das propriedades do material.

2.1. Discretização espacial do tratamento

Dado que a capacidade dissipativa destes tratamentos está sobretudo relacionada com

a elevada deformação de corte que se desenvolve na camada viscoelástica, é fundamental que o modelo de elementos finitos permita descrever correctamente essa deformação.

A teoria clássica dos laminados não permite descrever de forma correcta a deformação de corte da camada viscoelástica, sendo necessário o desenvolvimento de um novo modelo que represente a estrutura compósita placa base/tratamento.

Os modelos propostos utilizam um elemento tridimensional hexaédrico para representar a camada viscoelástica no modelo de elementos finitos do tratamento, figura 4. A placa base e a camada de restrição, ou placas adjacentes no caso do tratamento integrado, são modelizadas através de elementos de placa ou elementos hexaédricos.

A figura 4 apresenta três modelos desenvolvidos sobre estes pressupostos. O primeiro modelo (modelo 1) representa a placa base e a restrição através de elementos de placa cujos graus de liberdade de translação são rigidamente ligados aos graus de liberdade do elemento hexaédrico que representa a camada viscoelástica [7]. No segundo modelo (modelo 2) proposto [8,9], os nós dos elementos de placa são coincidentes com os nós do elemento tridimensional, sendo introduzido na formulação do elemento de placa o desvio real, que corresponde a metade da espessura da placa. No terceiro modelo (modelo 3) modeliza-se a estrutura base, a camada viscoelástica e a camada de restrição utilizando elementos tridimensionais hexaédricos para cada uma das camadas do conjunto placa-tratamento-restrição.

Neste estudo, em virtude de se verificar que os resultados obtidos são idênticos para os três modelos propostos, utilizou-se o modelo 2 devido à sua maior simplicidade no processo de discretização e geração do modelo espacial.

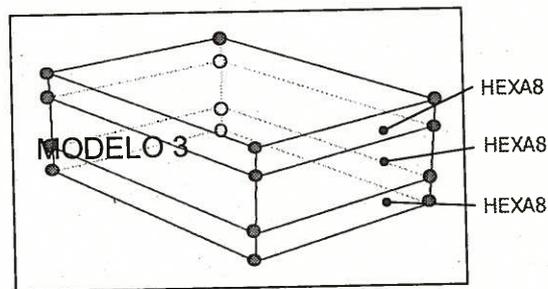
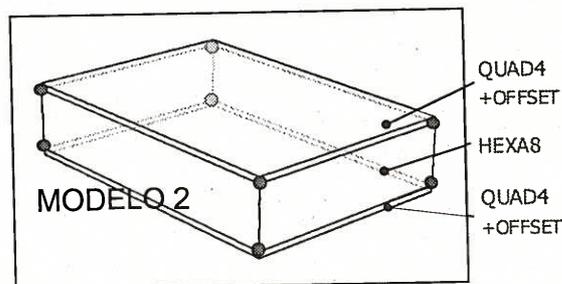
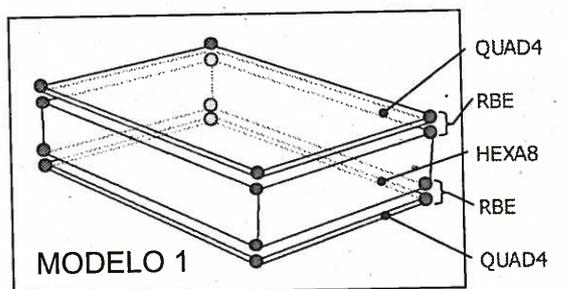
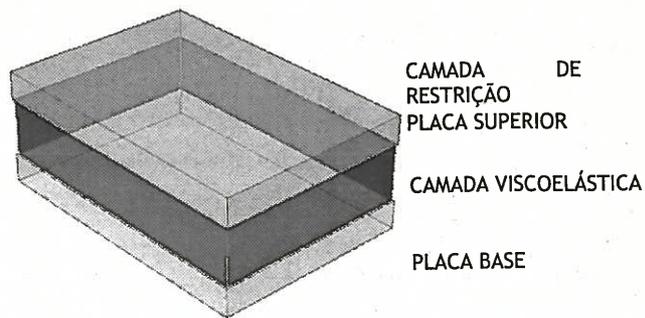


Fig 4 – Modelos de elemento finitos

De notar que o modelo 1, apesar da sua complexidade na implementação, é o único modelo proposto que permite simular o comportamento do tratamento quando sujeito a descolamentos locais, por simples omissão de alguns elementos de ligação rígida em zonas predefinidas.

2.2. Modelização dos materiais viscoelásticos

O material viscoelástico exhibe um grande factor de perda, principalmente na sua zona de transição.

A modelização do comportamento dos materiais viscoelásticos tem sido alvo de intensa investigação. Vários autores [10,11,12] desenvolveram, com base no modelo reológico de Kelvin, formulações no domínio da frequência e no domínio do tempo. No entanto, essas formulações exigem a criação de graus de liberdade extra para descrever a dependência das propriedades do material com a frequência.

O módulo de elasticidade complexo permite caracterizar, no domínio da frequência e considerando a excitação harmónica, os materiais viscoelásticos. Desta forma, o material viscoelástico é tratado como um corpo homogéneo cuja rigidez é uma entidade complexa.

O módulo extensional (ou de corte) complexo é descrito pela sua parte real, que representa o módulo de ganho, e pela sua parte imaginária, que representa o módulo de perda.

O factor de perda do material define-se pela razão entre o módulo de perda e o módulo de ganho.

Na figura 5 apresenta-se o nomograma do material viscoelástico utilizado neste estudo. Esta representação apresenta numa só curva a variação do módulo de elasticidade real (extensional ou de corte), ou do factor de perda, com a temperatura e a frequência [13].

2.3. Modelo espacial dos elementos finitos

O modelo espacial de elementos finitos da estrutura-tratamento, definido pelo sistema de equações de movimento, apresenta-se na forma:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K(\omega, T)]\{x\} = \{f(t)\} \quad [1]$$

A matriz de rigidez $[K(\omega, T)]$ é constituída por uma matriz de rigidez elástica, matriz de rigidez das placas base e da camada de restrição, e pela matriz de rigidez da camada viscoelástica, matriz de rigidez complexa:

$$[K(\omega, T)] = [K_e] + [K_v(\omega, T)] \quad [2]$$

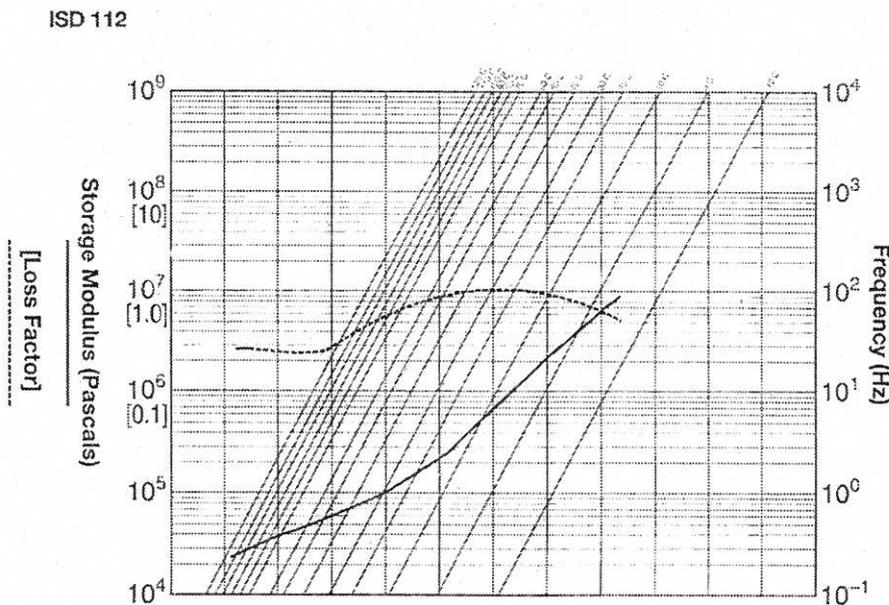


Fig 5 – Nomograma do material 3M ISD 112 [14]

Os termos da matriz de rigidez viscoelástica, para além de serem de natureza complexa, variam com a temperatura e a frequência.

Considerando que a excitação é harmónica e da forma:

$$\{f(t)\} = \{F\} e^{j\omega t} \quad [3]$$

então a resposta estacionária do sistema será da forma:

$$\{x(t)\} = \{\bar{X}\} e^{j\omega t} \quad [4]$$

onde o vector $\{x(t)\} = \{\bar{X}\} e^{j\omega t}$ representa a amplitude e a fase da resposta. Assim, o sistema de equações de movimento em regime estacionário harmónico pode ser escrito na forma:

$$[[K(\omega, T)] - \omega^2 [M]] \{\bar{X}\} = \{F\} \quad [5]$$

2.4. Modelo de resposta em frequência

As funções de resposta em frequência para uma referência k , grau de liberdade excitado, definem-se como:

$$\{\alpha(\omega)\}_k = \left(\frac{\{\bar{X}(\omega)\}_k}{F_k} \right)_{F_i=0, \begin{cases} i=1, \dots, n \\ i \neq k \end{cases}} \quad [6]$$

e podem ser calculadas directamente a partir do modelo espacial pela resolução do sistema de equações [5],

$$[[K(\omega, T)] - \omega^2 [M]] \{\bar{X}(\omega)\}_k = \{\delta\}_k \quad [7]$$

onde as componentes δ_{mk} do vector $\{\delta\}_k$ são nulas para $m \neq k$ e valem 1 para $m = k$.

Considerando a temperatura constante, a

matriz de rigidez viscoelástica é apenas função da frequência. Assim, a geração das funções de resposta em frequência através de um varrimento em frequência implica, a cada passo, a actualização da matriz de rigidez e a resolução do sistema de equações [7], conforme se esquematiza na figura 6.

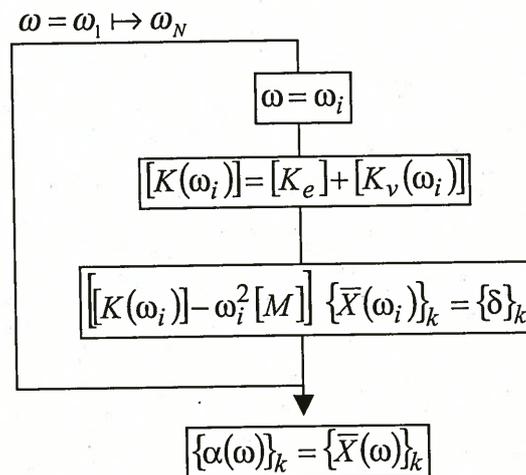


Fig 6 – Diagrama do cálculo directo das funções de resposta em frequência

Deste modo, constrói-se o modelo de resposta em frequência do sistema directamente a partir das matrizes do modelo espacial, actualizando a matriz de rigidez a cada valor de frequência.

3. VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

De forma a validar o modelo de elementos finitos, os resultados obtidos para as funções de resposta em frequência foram comparados com resultados experimentais obtidos em placas de alumínio tratadas com tratamentos superficiais com restrição e com tratamento integrado[3].

A tabela 1 resume as características dos

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]
1	298x197	com restrição	2 / 0.125 / 0.25
2	298x197	com restrição	2 / 0.250 / 0.30
3	298x198	integrado	1 / 0.125 / 1
4	298x198	integrado	1 / 0.380 / 1

provetes utilizados.

As placas utilizadas no estudo experimental foram discretizadas segundo uma malha de medição constituída por 25 pontos, conforma ilustrado na figura 7.

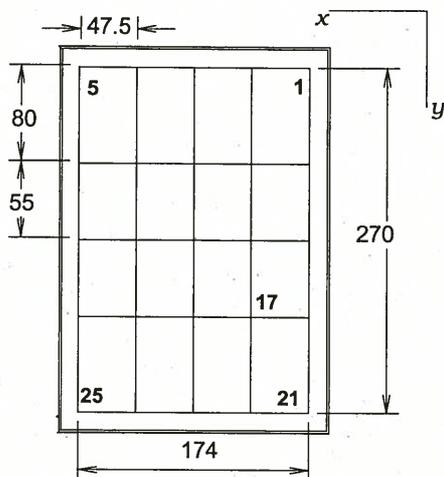


Fig 7 – Malha de medição experimental

A placa foi excitada na direção normal ao seu plano no ponto 17, que constitui a referência, através de um martelo de impacto instrumentado e a resposta pontual em cada um dos 25 pontos de medição foi obtida através de um acelerómetro piezoeléctrico.

Com o sinal dos transdutores da excitação e da resposta e utilizando um analisador dinâmico de sinal obtiveram-se as 25 funções de resposta em frequência do modelo.

As funções de resposta em frequência assim geradas serviram de referência na validação do modelo de elementos finitos proposto.

4. RESULTADOS

Em seguida, apresentam-se e comparam-se os resultados obtidos por via numérica com os experimentais em termos das funções de resposta em frequência.

As funções de resposta em frequência são apresentadas sob a forma de magnitude e fase e são do tipo aceleração.

Dado que o estudo experimental foi desenvolvido num ambiente com

temperatura não controlada, e pressupondo que a temperatura ambiente durante a realização dos ensaios poderia variar entre 20 e 30°C, os resultados experimentais foram correlacionados com resultados numéricos obtidos para 20, 25 e 30°C, que correspondem às três curvas contínuas representadas nas figuras seguintes.

Provete 1

Este provete apresenta um tratamento superficial com restrição cuja camada viscoelástica, em ISD112, tem uma espessura de 0.125mm e a camada de restrição em alumínio mede 0.250mm de espessura.

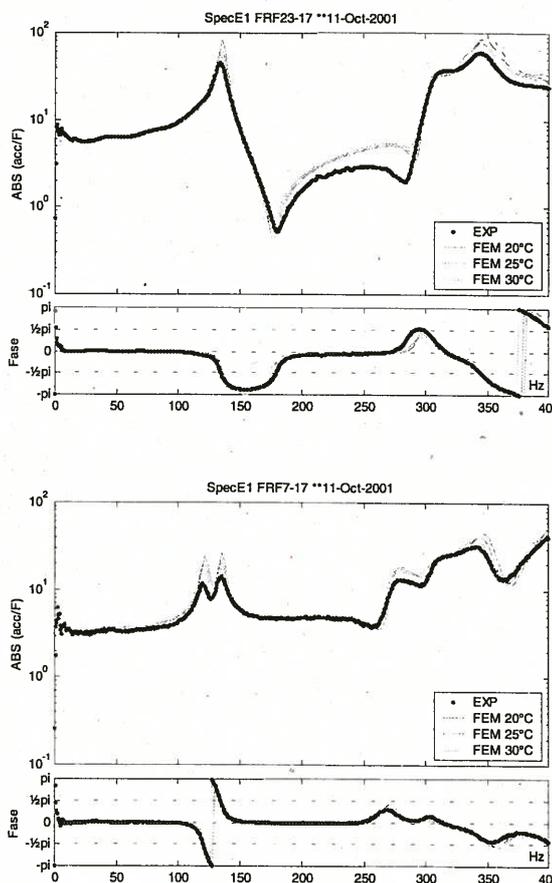


Fig 8 – Comparação de funções de resposta em frequência para o provete 1

A análise comparativa revela uma boa concordância existente entre os resultados obtidos por via numérica e as funções de resposta em frequência experimentais, quer ao nível da magnitude quer ao nível da fase.

Provete 2

Este provete apresenta um tratamento superficial com restrição mais espessa que o anterior.

A camada viscoelástica e a camada de restrição têm, respectivamente, uma espessura de 0.25mm e de 0.30mm.

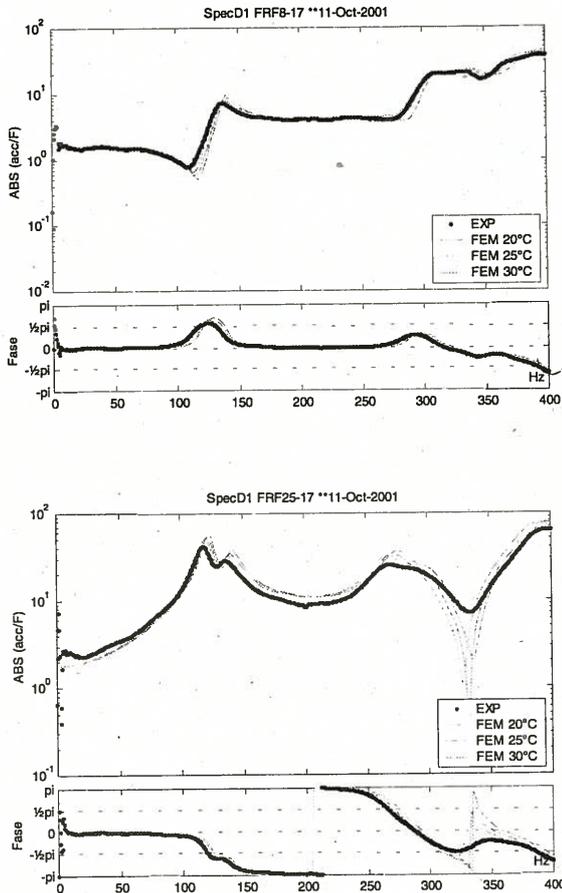


Fig 9 – Comparação de funções de resposta em frequência para o provete 2

Neste provete continua a verificar-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e os experimentais.

Provete 3

Este provete é constituída por duas placas de alumínio com 1mm de espessura, entre as quais se colocou uma camada viscoelástica, também em ISD112, com uma espessura de 0.125 mm

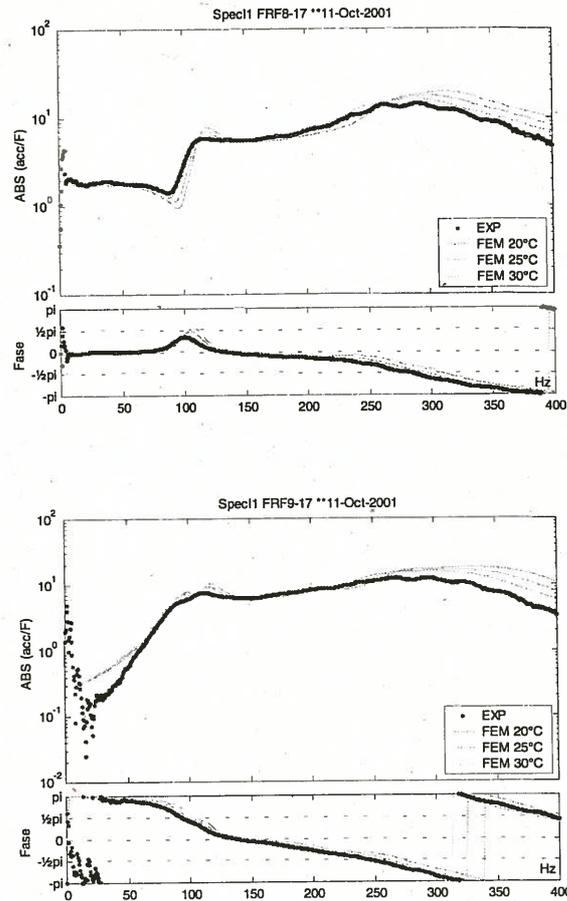


Fig 10 – Comparação de funções de resposta em frequência para o provete 3

Nas funções apresentadas é visível que este tratamento apresenta uma elevada eficiência. Isto deve-se ao facto de a camada dissipativa ser colocada sobre o plano neutro do conjunto, ou seja, na zona onde a tensão de corte é máxima. Porém, também para esta configuração de tratamento verifica-se uma boa concordância entre as funções de resposta em frequência numéricas e experimentais.

Provete 4

Este provete, idêntico ao anterior, possui uma camada viscoelástica integrada mais espessa de 0.38mm.

Neste caso, a camada viscoelástica integrada espessa conduz a um amortecimento elevado. No entanto, o modelo proposto gera funções de resposta em frequência que, globalmente, apresentam uma boa concordância com as

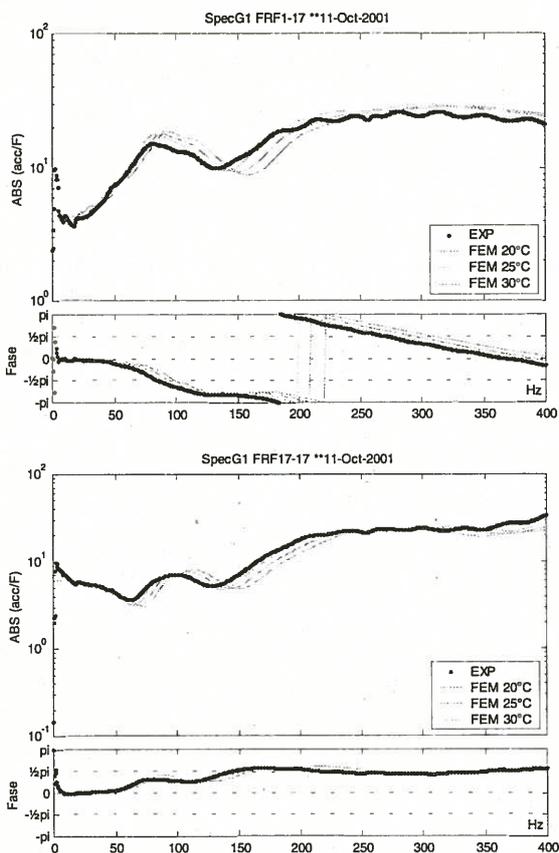


Fig 11 – Comparação de funções de resposta em frequência para o provete 4

experimentais ao nível da magnitude e da fase.

Neste caso, a camada viscoelástica integrada espessa conduz a um amortecimento elevado. No entanto, o modelo proposto gera funções de resposta em frequência que, globalmente, apresentam uma boa concordância com as experimentais ao nível da magnitude e da fase.

CONCLUSÕES

Os tratamentos viscoelásticos constituem uma boa solução no controlo de vibração em estruturas leves onde o peso e alteração estrutural são dois factores importantes.

Os tratamentos integrados permitem obter elevados níveis de amortecimento mas exigem a substituição da placa base por uma placa “sandwich” com núcleo viscoelástico.

O modelo proposto permite simular de forma correcta o padrão de deformação que se desenvolve na camada viscoelástica.

O módulo complexo constitui uma forma simples de introduzir as propriedades do material viscoelástico em análises numéricas desenvolvidas no domínio da frequência, assumindo que a excitação da estrutura é do tipo harmónico.

Os modelos apresentados permitem ainda introduzir no modelo de elementos finitos a variação das propriedades do material viscoelástico com a frequência e com a temperatura.

A comparação das funções de resposta em frequência revela, globalmente, uma boa concordância entre os resultados numéricos e a análise experimental, ao nível da magnitude e da fase das funções de resposta em frequência.

No entanto, dada a reduzida espessura da camada viscoelástica e de forma a evitar o efeito de “locking” nos elementos tridimensionais, é necessário utilizar uma malha muito refinada. Nos testes realizados, a malha utilizada para discretizar uma placa plana com 300 por 200 mm possui 9384 graus de liberdade. Para além disso, o processo de modelação da malha de elementos finitos constitui uma tarefa morosa e complexa.

Assim, como conclusão final deste trabalho verifica-se que, apesar do modelo proposto permitir obter bons resultados, a sua geração não é expedita em particular no caso de tratamentos viscoelásticos aplicados a componentes estruturais de geometria complexa.

REFERÊNCIAS

- [1] - Johnson, C.D., “Design of Passive Damping Systems”, Special 50th Anniversary Design Issue, Transactions of the ASME, Vol.117, Junho, 1995, pp.171-176.
- [2] - Nashif, A.D., Jones, D.I.G., Henderson, J.P., “Vibration Damping”, John Wiley & Sons, 1985.
- [3] - Moreira, R. A., “Análise do Comportamento Dinâmico de Placas com Tratamento Passivo por Amortecimento Viscoelástico”, Dissertação

de Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996.

- [4] - Rodrigues, J., Moreira, R., "Passive Damping Control of Plates with Viscoelastic Layers: Study on Dynamics Characteristics and Radiated Noise, Integrity, Reliability & Failure '99, Porto, Portugal, 1999, pp.247-248
- [5] - Moreira, R., Rodrigues, J., "Partial Viscoelastic Surface Damping Treatments", Book of Abstracts of Mechanics and Materials in Design 3, Orlando, USA, 2000, pp.171-172
- [6] - Moreira, R., Rodrigues, J., "Damping Optimization of Sandwich Plates with Integrated Viscoelastic Layer", Proceedings of Mechanics in Design '98, The Nottingham Trent University, Nottingham, UK, 1998, pp.274-283.
- [7] - Taylor, D.W., "A finite element modeling approximation for damping material used in constrained damped structures", Letters to the Editor, Journal of Sound and Vibration, Vol, 97-2, pp.352-354, 1984.
- [8] - Plouin, A., Balmès, E., "Steel / Viscoelastic / Steel sandwich shells computational methods and experimental validations", IMAC, 2000.
- [9] - Plouin, A., Balmès, E., "A test validated model of plates with constrained viscoelastic materials", IMAC, 1999.
- [10] - McTavish, D.J., Hughes, P.C., "Modeling of linear viscoelastic space structures", Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME, Vol.115, 1993, pp.103-110.
- [11] - Lesieutre, GA, Mingori, DL, "Finite element modelling of frequency-dependent material damping using augmented thermodynamic fields", Journal of Guidance and Control, 1990.
- [12] - Park, C.H., Inman, D.J., Lam, M.J., "Model reduction of viscoelastic finite element models", Journal of Sound and Vibration, Vol.219, no.4, 1999, pp.619,637.
- [13] - Jones, D.I.G., "Application of damping treatments", Shock and Vibration Handbook, Harris, C.M, (editor), 3ª edição, C.37, 1988.
- [14] - 3M, "Scotchdamp™ Vibration Control Systems, 3M Industrial Specialties Division, St.Paul, MN, 1993.

