VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DE CAMADAS APLICADO A ESTRUTURAS COM TRATAMENTO VISCOELÁSTICO

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

*Departamento Engenharia Mecânica. Universidade de Aveiro
**DEMEGI. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

RESUMO

A aplicação de materiais viscoelásticos, sob a forma de tratamentos superficiais com restrição ou tratamentos integrados, constitui uma das formas de controlo do comportamento dinâmico de estruturas que alia uma elevada eficiência à simplicidade de tratamento e custo reduzido. Todavia, o mecanismo de amortecimento associado exige um processo de simulação numérica cujo procedimento de modelização espacial requer a aplicação de modelos de elementos finitos capazes de descrever correctamente o padrão de deformação que é desenvolvido na camada dissipativa. Neste estudo é desenvolvido um modelo de elementos finitos por camadas que permite simplificar significativamente a componente de modelação espacial da simulação numérica de placas com tratamento superficial com restrição ou com tratamento integrado, abordando com especial relevo o processo de validação experimental. Dado o elevado nível de amortecimento apresentado pelos provetes utilizados no estudo de validação, a simulação numérica foi desenvolvida com base na análise directa em frequência, que permitiu a comparação directa entre as curvas das funções de resposta em frequência simuladas com as curvas homólogas obtidas directamente da análise experimental. Os resultados numéricos obtidos foram comparados com os dados experimentais, através da comparação directa das funções de resposta em frequência e por aplicação de indicadores de correlação de funções de resposta em frequência, permitindo a validação do modelo de elementos finitos desenvolvido.

1 INTRODUÇÃO

A evolução do *design*, a aplicação de novos métodos construtivos e o desenvolvimento de novos materiais no campo da engenharia estrutural, nomeadamente na indústria automóvel, aeronáutica e aeroespacial, tem conduzido ao desenvolvimento de estruturas cada vez mais leves e resistentes, aliando a elevada resistência ao reduzido peso dos novos materiais utilizados (ligas de alumínio, ligas de titânio, materiais compósitos, entre outros) .

Todavia, estes novos materiais, bem como as novas técnicas construtivas aplicadas, têm levado à gradual remoção dos mecanismos dissipativos outrora existentes nas pesadas e estruturalmente pouco eficientes estruturas em ferro fundido e estruturas de construção rebitada. Surge assim a crescente necessidade de desenvolver e aplicar mecanismos

adicionais que promovam uma capacidade de amortecimento capaz de permitir o bom desempenho dinâmico da estrutura alvo.

A aplicação de materiais viscoelásticos em estruturas leves constitui uma forma simples e eficaz de introdução de elevados níveis de amortecimento [1-3]. No entanto, a aplicação mais eficiente das camadas viscoelásticas em placas ou vigas, sob a forma de tratamentos superficiais com restrição (CLD) (Fig 1) ou tratamentos de camada integrada (ILD) (**Fig 2**) [4,5], requer um estudo prévio adequado recorrendo a processos de simulação numérica de forma a optimizar a sua aplicação.

2 ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elemento finitos (MEF) surge como uma ferramenta numérica muito útil neste processo de simulação, devendo-se no entanto ter em consideração os seguintes aspectos:

- caracterização das propriedades do material viscoelástico;
- método de análise;
- discretização espacial e modelo de elementos finitos.

A caracterização do material e o método de análise relacionam-se entre si, existindo diversas formas, às quais se encontram associados vários graus de aproximação, de introduzir as propriedades do material viscoelástico e de desenvolver a análise numérica de forma a obter o modelo de resposta ou modelo modal da estrutura com tratamento [6,7].

Independentemente do método de análise adoptado, o processo de discretização do tratamento em elementos finitos deve ser cuidadosamente analisado.

2.1 Discretização espacial

A discretização espacial do tratamento constitui o elemento chave na obtenção de resultados numéricos válidos.

De facto, este tipo de tratamento é caracterizado pela elevada deformação de corte que é imposta na camada dissipativa, a qual é directamente responsável pelo amortecimento introduzido na estrutura.

Por esta razão é usual utilizar modelos combinados que são obtidos associando elementos convencionais de placa e elementos hexaédricos, utilizando estes últimos na representação da camada viscoelástica. Moreira e Rodrigues [7] analisam e comparam o desempenho de três modelos combinados na análise de tratamentos superficiais com restrição e tratamentos integrados, validando a aplicabilidade dos modelos analisados na análise de placas com tratamento com restrição e tratamento integrado.

2.2 Modelo de camadas

Apesar da excelente representatividade dos modelos combinados, a sua aplicação requer um processo moroso e complexo de geração da malha de elementos finitos. Para além disso, é necessário repetir todo o processo de geração da malha sempre que se pretenda alterar uma espessura do tratamento.

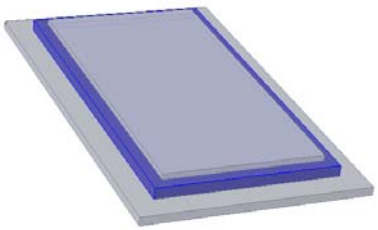

Fig 1 - Tratamento viscoelástico com restrição (CLD)

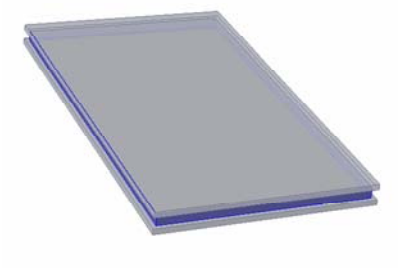

Fig 2 - Tratamento viscoelástico integrado (ILD)

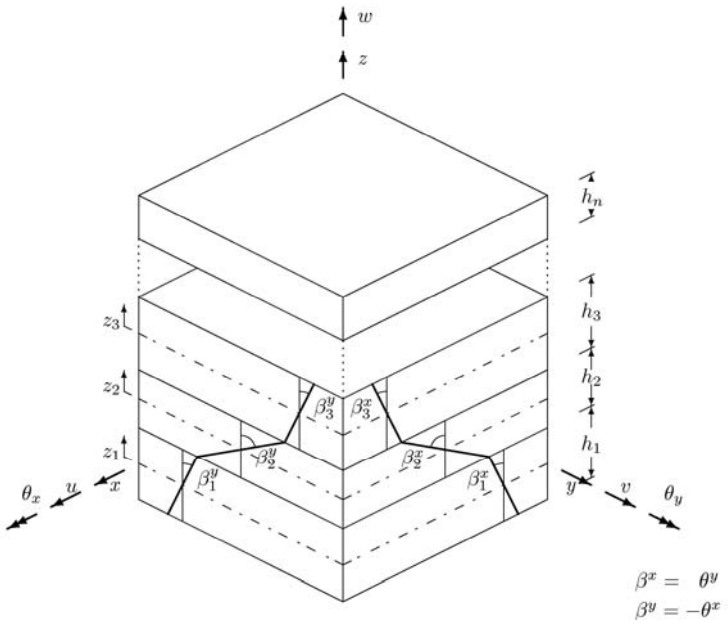

Fig 3 - Modelo de camadas

Assim, desenvolveu-se um modelo de camadas (**Fig 3**), baseado na teoria *layerwise*, que apresenta como vantagem principal o facto de apenas ser necessário discretizar a estrutura base em elementos quadriláteros, sendo a caracterização das camadas adicionais do tratamento realizada ao nível da formulação do elemento, bastando para isso definir uma tabela de dados no ficheiro de entrada onde conste o número de camadas, as suas dimensões características e propriedades dos materiais constituintes.

2.3 Método de análise

Um procedimento de validação numérica de um elemento finito requer a obtenção de resultados numéricos fidedignos, evitando os erros, associados à aplicação de métodos de caracterização das propriedades dos materiais viscoelásticos e de métodos de análise aproximados, que embora possam ser considerados desprezáveis em processos de simulação para aplicações práticas, devem ser nestes casos evitados a fim de validar correctamente o modelo numérico em análise.

Assim, neste trabalho, o processo de simulação numérica recorre ao método do módulo complexo, para representar as propriedades dos materiais viscoelásticos, e à análise directa em frequência [6,7] para calcular o modelo de resposta em frequência (ou apenas algumas funções de resposta em frequência) da estrutura analisada.

O elemento finito proposto foi implementado em ambiente Matlab, recorrendo-se à toolbox adicional SDT5.0 [8] para as tarefas de geração de malha, manipulação e montagem das matrizes globais do modelo de elementos finitos e pós-processamento de resultados.

O objecto do estudo numérico corresponde aos provetes utilizados no trabalho de validação experimental, cujas características se encontram resumidas na **Tabela 1**, sendo os materiais utilizados nos provetes caracterizados na Tabela 2.

3 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Para validar o elemento finito proposto, compararam-se as funções de resposta em frequência geradas numericamente com as curvas homólogas obtidas no estudo experimental em provetes tratados.

Tabela 1- Características dos provetes experimentais

	Dimensões a×b[mm]	Espessuras H1 | H2 | H3 [mm]		
Provete 1 (CLD)	298×197	2.0	0.125	0.250
Provete 2 (ILD)	298×198	1.0	0.125	1.0

Tabela 2- Propriedades dos materiais dos provetes

	Material	Módulo de *Young* [GPa]	Coeficiente de *Poisson*	Massa volúmica [$Kg.m^{-3}$]
Camada 1	Alumínio	69.5	0.32	2710
Camada 2	3M ISD112	[9]	0.49	1140
Camada 3	Alumínio	69.5	0.32	2710

3.1 Provetes experimentais

Para validar experimentalmente a aplicação do modelo proposto na simulação das duas configurações de tratamento, CLD e ILD, usaram-se dois provetes (Tabela 1) tratados segundo as duas morfologias.

O provete 1, com tratamento superficial com restrição, foi obtido a partir de uma chapa de alumínio com 2mm de espessura sobre a qual foi colado um tratamento com restrição formado por um filme fino de material viscoelástico 3M ISD112, usualmente empregue em tratamentos passivos, e por uma folha fina de alumínio que constitui a restrição.

O provete 2, com tratamento integrado, é constituído por uma placa *sandwich* cujo núcleo é formado por uma camada muito fina de material viscoelástico 3M ISD112. As placas externas da *sandwich* são obtidas a partir de chapa de alumínio com 1 mm de espessura cujas propriedades são descritas na Tabela 1.

O filme viscoelástico é auto-adesivo à temperatura ambiente, facilitando a construção das placas sandwich.

A união entre as camadas é garantida pela limpeza cuidada das placas e por um estágio a 30ºC numa prensa de pratos quentes para homogeneização de espessura.

O módulo de corte complexo do material viscoelástico 3M ISD112 é caracterizado no nomograma publicado pelo fabricante [9].

3.2 Metodologia experimental

Para obtenção das funções de resposta em frequência das placas com tratamento viscoelástico, mediu-se a velocidade de resposta segundo a normal à face da placa em 25 pontos (**Fig 4**) através de um transdutor sem contacto (vibrómetro laser). A excitação da placa é do tipo aleatório, sendo aplicada no ponto 17 através de um excitador electromagnético, cuja força é medida através de um transdutor de força piezoeléctrico. A ligação entre o transdutor e o excitador é efectuada por uma haste fina e amortecida (**Fig 5**).

O ponto de excitação foi escolhido de forma a evitar a sua localização sobre as linhas nodais dos seis primeiros modos naturais de vibração contidos na gama de frequências de 0 a 400Hz.

Os sinais obtidos dos transdutores são condicionados num analisador espectral que incorpora também um gerador de sinal, usado na geração do sinal aleatório, na gama de frequências referida, que é aplicado no amplificador do excitador electromagnético.

O cálculo das funções de resposta em frequência em acelerância é efectuado pelo mesmo analisador espectral, sendo necessário derivar previamente a resposta em velocidade medida pelo vibrómetro laser.

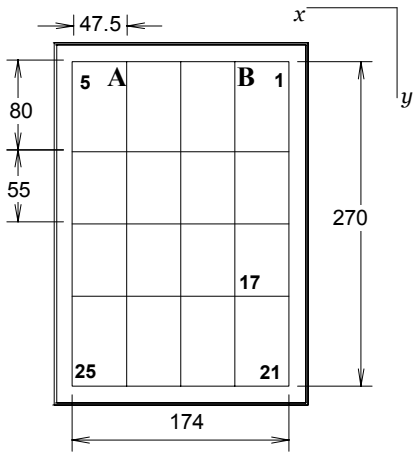

Fig 4 - malha de pontos de medição

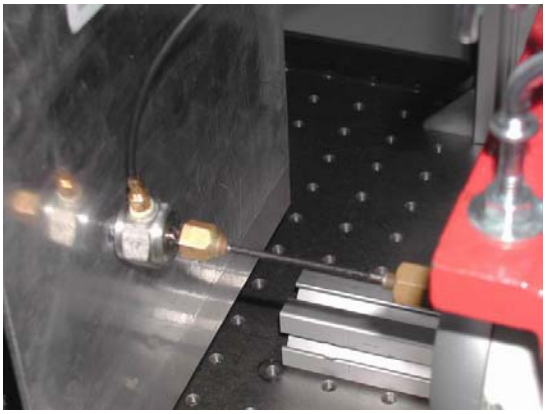

Fig 5 - Excitação da placa (célula de carga, haste de ligação e excitador)

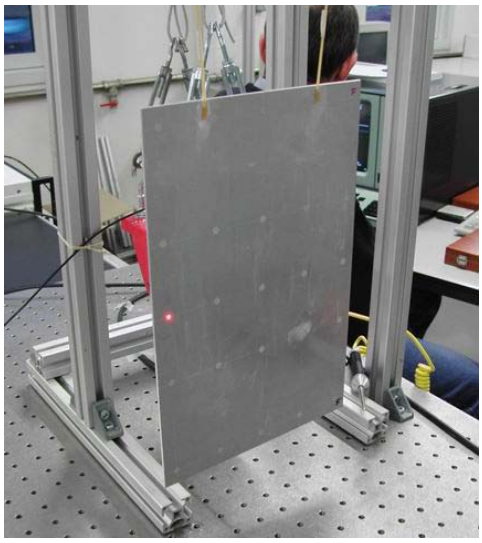

Fig 6 - Montagem experimental

Dada a dependência das propriedades do material viscoelástico com a temperatura, a determinação experimental das funções de resposta em frequência dos provetes foi acompanhada da medição da temperatura ambiente através de um termopar colocado junto ao provete (Fig 6).

3.3 Equipamento

Para além de um conjunto de acessórios, cabos e equipamento próprio fabricado no laboratório (p.ex. hastes e sistema de suspensão), o conjunto de equipamento utilizado neste estudo é constituído por:

- Vibrómetro laser *Polytec OFV303*
- Controlador *Polytec OFV3001*
- Transdutor de força *Bruel&Kjaer 8200*
- Excitador electromagnético *LDS201*
- Amplificador *LDS PA25E*
- Analisador espectral B*ruel&Kjaer2035*
- Medidor de termopar *Omega HH23*
- Termopar K

3.4 Montagem experimental

Uma das maiores dificuldades encontradas durante a comparação de resultados numéricos com dados experimentais é devida à falta de representatividade das condições de fronteira reais da montagem experimental relativamente às condições de fronteira impostas no modelo numérico.

De forma a minimizar o efeito das condições de fronteira no processo de validação, considerou-se a situação de placa livre. Assim, para obter condições de fronteira na montagem experimental próximas das consideradas no modelo numérico, optou-se por suspender os provetes com elásticos colados sobre as linhas nodais do 4º modo natural de vibração (pontos A e B da Fig 4). O conjunto foi suspenso num pequeno pórtico, como ilustrado na Fig 6.

O excitador foi suspenso num pórtico independente.

4 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O elemento finito proposto é validado através da comparação das funções de resposta em frequência medidas e as funções de resposta em frequência geradas numericamente.

4.1 Comparação visual

As figuras 7 e 8 representam as funções de resposta em frequência directas, experimental e numérica, através da sua magnitude e fase, para os dois provetes analisados.

Comparando as duas curvas sobrepostas, verifica-se existir uma boa correlação entre os resultados numéricos e a medição efectuada.

Nas funções obtidas experimentalmente são visíveis os efeitos dos modos de corpo rígido resultantes da montagem experimental (suspensão e rigidez da haste). No entanto, o primeiro modo natural estrutural possui uma frequência bem separada desta gama.

De notar ainda que, para os modos naturais de frequência mais elevada verifica-se um ligeiro decréscimo do nível de correlação, em especial no provete com tratamento superficial, que é resultado da

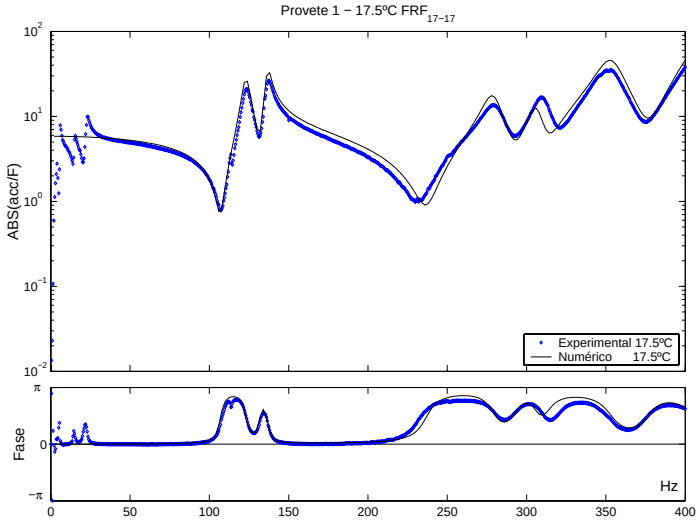

Fig 7- Função de resposta em frequência directa - provete 1 (17.5ºC)

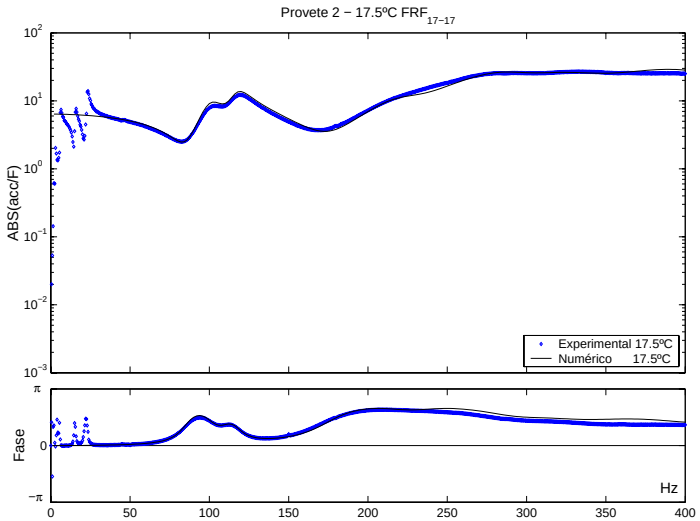

Fig 8 - Função de resposta em frequência directa - provete 2 (17.5ºC)

gradual falha de representatividade da discretização espacial devida aos limites da resolução da malha de elementos finitos considerada.

4.2 Indicadores de correlação

Embora a análise visual das curvas sobre-postas forneça indicações sobre a correlação dos resultados obtidos, este tipo de análise é subjectivo e meramente qualitativo.

Assim, de forma a obter uma quantificação objectiva do nível de correlação verificado entre as medições efectuadas e os resultados numéricos obtidos com o elemento finito proposto, são utilizados indicadores de correlação de funções de resposta em frequência.

Os dois primeiros indicadores, Global Shape Criterium (GSC) e Global Amplitude Criterium (GAC) [10], permitem quantificar, através de uma função em frequência, a correlação entre as funções de resposta em frequência. Desta forma, é possível verificar o nível de correlação ao longo da frequência para todos os graus de liberdade considerados.

Na **Tabela 3** apresentam-se as expressões para os indicadores utilizados neste estudo. O resultado da análise efectuada com estes dois critérios é ilustrado nas figuras 9 e 10, onde é evidente a fraca correlação existente na gama de frequências entre 0 e 30Hz, correspondente ao efeito dos modos de corpo rígido da montagem experimental.

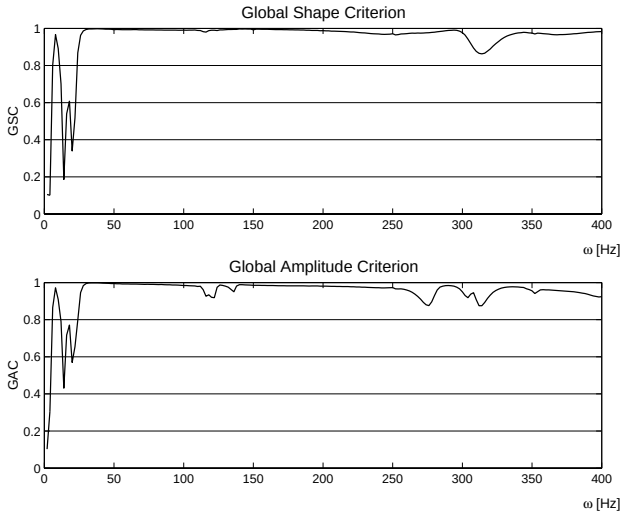

Fig 9 - Indicadores GSC e GAC para o provete 1 (17.5ºC)

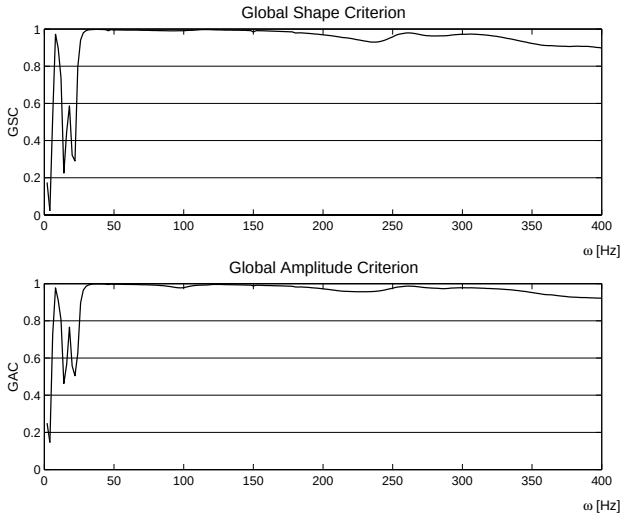

Fig 10 - Indicadores GSC e GAC para o provete 2 (17.5ºC)

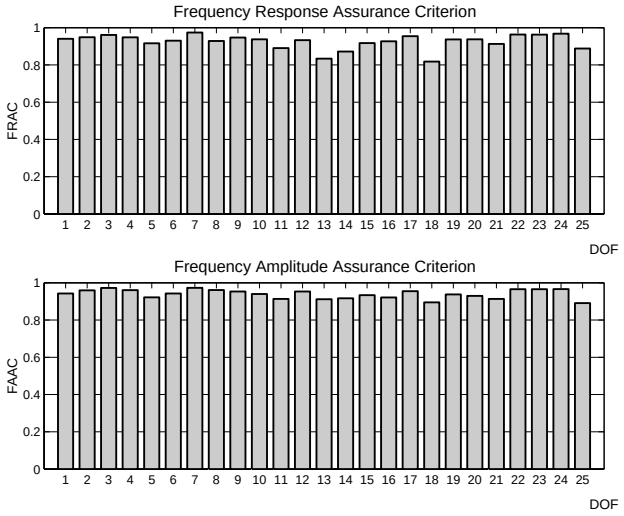

Fig 11 - Indicadores FRAC e FAAC para o provete 1 (17.5ºC)

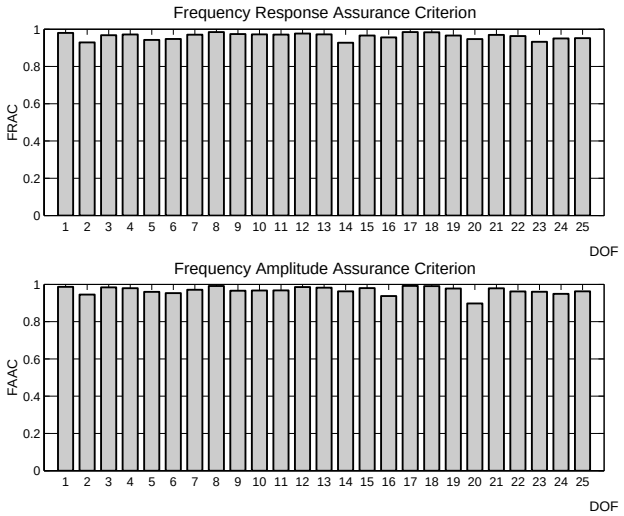

Fig 12 - Indicadores FRAC e FAAC para o provete 2 (17.5ºC)

Tabela 3 - Critérios de correlação de funções de resposta em frequência

- Global Shape Criterium:

$$GSC(\omega) = \frac{\left|\{H_X(\omega)\}^H \{H_A(\omega)\}\right|^2}{\left(\{H_X(\omega)\}^H \{H_X(\omega)\}\right)\left(\{H_A(\omega)\}^H \{H_A(\omega)\}\right)}$$

- Global Amplitude Criterium

$$GAC(\omega) = \frac{2\left|\{H_X(\omega)\}^H \{H_A(\omega)\}\right|}{\left(\{H_X(\omega)\}^H \{H_X(\omega)\}\right) + \left(\{H_A(\omega)\}^H \{H_A(\omega)\}\right)}$$

- Frequency Response Assurance Criterium

$$FRAC_{jk} = \frac{\left|\{H_X(\omega_i)\}_{jk}^H \{H_A(\omega_i)\}_{jk}\right|^2}{\left(\{H_X(\omega_i)\}_{jk}^H \{H_X(\omega_i)\}_{jk}\right)\left(\{H_A(\omega_i)\}_{jk}^H \{H_A(\omega_i)\}_{jk}\right)}$$

- Frequency Amplitude Assurance Criterium

$$FAAC_{jk} = \frac{2\left|\{H_X(\omega_i)\}_{jk}^H \{H_A(\omega_i)\}_{jk}\right|}{\left(\{H_X(\omega_i)\}_{jk}^H \{H_X(\omega_i)\}_{jk}\right) + \left(\{H_A(\omega_i)\}_{jk}^H \{H_A(\omega_i)\}_{jk}\right)}$$

Os indicadores Frequency Response Assurance Criterium (FRAC) e Frequency Amplitude Assurance Criterium (FAAC) [10,11,12] permitem avaliar o nível de correlação, para cada um dos graus de liberdade medidos, considerando a informação obtida na gama de frequências considerada (0-400Hz). Estes indicadores permitem evidenciar a contribuição de cada um dos graus de liberdade na correlação global entre os resultados em comparação.

As figuras 11 e 12 representam os indicadores FRAC e FAAC calculados com os resultados obtidos nos dois provetes analisados.

De acordo com os resultados obtidos, o nível de correlação apresenta uma distribuição razoavelmente uniforme ao longo de todos os graus de liberdade medidos. Este resultado indica que o nível de correlação verificado nos indicadores anteriores (GAC e GSC) é uniforme para todos os graus de liberdade.

Estes indicadores permitem, também, fornecer informação sobre a qualidade da medição obtida para cada um dos graus de liberdade e a representatividade da malha de elementos finitos na definição das formas modais.

5 CONCLUSÕES

Os tratamentos viscoelásticos superficiais com restrição e integrados constituem um mecanismo de controlo dinâmico de estruturas que alia uma elevada eficiência a uma reduzida alteração estrutural, quer ao nível da massa do conjunto, quer em termos de modificação da estrutura.

Todavia, o projecto deste tipo de tratamentos requer a utilização de ferramentas numéricas, nomeadamente o método dos elementos finitos, que devem, por um lado considerar as propriedades dos materiais viscoelásticos e, por outro, representar correctamente a elevada deformação de corte que ocorre na camada viscoelástica.

A aplicação de modelos combinados [6,7] permite representar correctamente esse padrão de deformação, embora exija um processo de modelização espacial muito complexo e moroso. Para além disso, utilizando esta forma de modelização é necessário repetir todo o processo de discretização espacial quando se pretende modificar qualquer uma das espessuras da estrutura tratada. A complexidade associada a esta forma de modelização torna-a proibitiva na análise de tratamentos multi-camada.

O elemento finito proposto permite simplificar significativamente o processo de geração da malha de elementos finitos, usando um gerador convencional de elementos finitos de placa, e revela-se particularmente adequado para modelizar tratamentos multi-camada.

A validação do novo elemento finito é realizada para duas configurações de tratamento, superficial com restrição e integrada, verificando-se a adequabilidade do modelo cinemático imposto no elemento finito à descrição da deformação de corte desenvolvida na camada viscoelástica, que é directamente responsável pela capacidade dissipativa do tratamento.

A montagem experimental permite representar convenientemente as condições de fronteira impostas no modelo numérico. Os efeitos dos modos de corpo rígido resultantes da suspensão e da rigidez de flexão da haste, embora evidentes, situam-se numa gama de frequências bem destacada do primeiro modo natural estrutural.

A correlação entre as funções de resposta em frequência geradas, recorrendo ao elemento finito proposto, e as medidas experimentalmente é excelente, resultado evidenciado tanto pela análise visual das curvas sobrepostas como pela análise dos indicadores de correlação.

A boa representatividade obtida com o elemento finito proposto permite, assim, validar a aplicabilidade da sua formulação

na simulação de tratamentos viscoelásticos com restrição e integrados.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à 3M (EUA) o fornecimento dos materiais viscoelásticos utilizados neste trabalho.

7 REFERÊNCIAS

1. Johnson, C.D., "Design of Passive Damping Systems", Special 50th Anniversary Design Issue, Transactions of the ASME, Vol.117, 1995, pp.171176.Nashif, A.D., Jones, D.I.G., Henderson, J.P., "Vibration Damping", John Wiley & Sons, 1985.
3. Jones, D.I.G.,"Handbook of Viscoelastic Vibration Damping", John Wiley & Sons, 2001.
4. Moreira, R., Rodrigues, J., "Damping Optimization of Sandwich Plates with Integrated Viscoelastic Layer", Proceedings of Mechanics in Design '98, NTU, Nottingham, UK, 1998, pp.274-283.
5. Moreira, R., Rodrigues, J. D., "Comportamento Dinâmico de Placas com Tratamento Passivo por Amortecimento Viscoelástico", in "Mecânica Experimental" , Nº2, Revista da APAET, 1997, pp.45-53.
6. Moreira, R., Rodrigues, J.D., "Modelização e Validação Experimental do Comportamento Dinâmico de Placas com Tratamento Passivo por Amortecimento Viscoelástico", in "Mecânica Experimental", Nº7, Revista da APAET, 2002, pp.93-101.
7. Moreira, R., Rodrigues, J.D., "Constrained Damping Layer Treatments: The Finite Element Modeling". Journal of Vibration and Control, 2004, 10(4), pp.575-595.
8. Balmès E. "Structural Dynamics Toolbox, V5.0, 2001.
9. 3M, "Scotchdamp^{TM} Vibration Control Systems, 3M Industrial Specialties Division, St.Paul, MN, 1993.
10. Zang, C., Grafe, H., Imregun, M., "Frequency Criteria for Correlating and Updating Dynamic Finite Element Models", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol 15-1, 2001, pp.139-155.
11. Ewins, D.J., "Modal Testing: Theory, Practice and Application", Second Edition, Research Studies Press, 2000.
12. Fotsch, D., Ewins, D.J., "Application of MAC in the Frequency Domain", IMAC XVIII, 2000.