

**STV.1****IDENTIFICAÇÃO DO DANO EM LAMINADOS COMPÓSITO ATRAVÉS DA COMBINAÇÃO DE DIFERENTES TÉCNICAS****Ricardo de Medeiros<sup>1(\*)</sup>, Hernani M.R. Lopes<sup>2</sup>, Rui M. Guedes<sup>3</sup>, Mário A.P. Vaz<sup>3</sup>, and Volnei Tita<sup>1</sup>**<sup>1</sup>EESC-USP, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Aeronáutica, São Carlos, Brasil.<sup>2</sup>DEM/ISEP, Instituto Politécnico do Porto, Porto, Portugal.<sup>3</sup>FEUP, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica, Porto, Portugal.(\*)Email: [medeiros@sc.usp.br](mailto:medeiros@sc.usp.br)**RESUMO**

A Monitorização da Integridade Estrutural (SHM – “*Structural Health Monitoring*”) é uma área de crescente interesse que utiliza abordagens inovadoras para aumentar a fiabilidade dos equipamenos e reduzir o número de intervenções. Por outro lado, as tarefas de manutenção e reparação das aeronaves comerciais representam cerca de um quarto dos seus custos operacionais. Assim, um sistema SHM instalado na estrutura permitirá garantir maior segurança e fiabilidade, mas também maximizar o intervalo de inspeção para aviões. Portanto, o sistema SHM permite substituir o habitual plano de manutenção preventiva pela manutenção condicionada, reduzindo os custos operacionais do avião e prevenindo manutenções desnecessárias. Neste caso, o emprego de um sistema SHM permitiria uma monitorização contínuo da estrutura, prolongando a sua vida através do diagnóstico precoce de danos. Uma outra aplicação para um sistema SHM, consiste em monitorar de partes da aeronave cujo acesso é difícil. Trata-se muitas vezes de elementos críticos de segurança estrutural, que durante inspeções programadas, requerem ampla desmontagem, acarretando custos e tempos de paragem elevados. Além disso, baseado no completo histórico de ocorrência, o sistema SHM também pode realizar um prognóstico da estrutura, prevendo a vida remanescente e a sua resistência residual. Diante desse cenário, o objetivo geral do trabalho consiste em desenvolver um metodologia capaz de identificar, localizar e quantificar o dano em estruturas fabricadas em material compósito, através da combinação de diferentes técnicas. Primeiramente, métodos baseados na resposta vibratória são aplicados com objetivo de identificar a ocorrência ou não de dano na estrutura. Tendo como esse objectivo em mente, foram realizados em ensaios experimentais em placas retangulares laminadas em fibras de carbono e resina epóxi. Três diferentes tipos de dano foram avaliados: dano provocado por impacto, dano no processo de fabricação (furo central) e delaminação. Sendo que este último foi provocado pela inserção de uma camada de teflon na região danificada, durante o processo de fabrico. O primeiro passo é a identificação das frequências naturais a partir da medição das Funções de Resposta em Frequência (FRFs) das estruturas intacta e danificada. Para tal, é utilizado excitação transiente causada pelo martelo de impacto, sendo a aquisição da resposta realizada através de quatro sensores piezoelétricos montados na superfície em posições previamente definidas. Os resultados foram analisados por meio de diferentes métricas de dano, sendo estas comparadas em termos de sua capacidade de identificação de danos na estrutura. Em seguida procedeu-se à localizar e identificar da dimensão do dano recorrendo à técnica ótica de Shearography Speckle (SS). Esta técnica tem demonstrado grande potencial na detecção de dano em estruturas laminadas compósito. A identificação do dano a partir das

medições realizadas com a técnica SS, tem por base a análise das perturbações no campo de rotações causada de heterogeneidade das propriedades do material. Estas deformações anormais podem ser verificadas como deformações típicas de componentes defeituosos. A SS é um método de interferometria laser sensível ao gradiente de deslocamento de uma superfície na direção fora do plano. Sob a ação de um pequeno carregamento, a estrutura é deformada e a presença de defeitos/dano é revelada através de singularidades locais do campo de deformação observado à superfície. Por fim, apresenta-se as vantagens e limitações da utilização de métodos baseados em vibrações combinados com a Shearography Speckle no contexto de SHM

## INTRODUÇÃO

A indústria aeronáutica é uma das mais inovadoras e sempre se vê obrigada a introduzir novos materiais (por exemplo: materiais compósitos) e novas tecnologias (por exemplo: estruturas inteligentes). Porém, ao mesmo tempo deve sempre atender a requisitos de certificação aeronáuticos a fim de garantir a aeronavegabilidade dos seus produtos. Dessa forma, o projeto aeronáutico torna-se extremamente desafiador, pois se por um lado, o mesmo visa à redução de custos de manutenção, a redução de peso da aeronave e dos custos diretos de operação, por outro lado, deve-se estar em conformidade com regulamentos rigorosos de aeronavegabilidade. Dentre as filosofias de projeto existentes atualmente, destacam-se: a “*safe life*” (vida segura) e a “*damage tolerance*” (tolerância ao dano). Em ambas as filosofias, principalmente esta última, preveem-se períodos de inspeção para regiões críticas da aeronave. No entanto, com base na literatura e na experiência de fabricantes e operadores, sabe-se que grande parte do custo associado às inspeções pode ser drasticamente reduzida, através do emprego de um sistema de manutenção acertadamente programado. Esta é uma tarefa muito difícil de ser atingida, principalmente, quando são usadas estruturas fabricadas em material compósito.

Diante do cenário supracitado, o monitoramento da integridade estrutural (SHM – “*Structural Health Monitoring*”) surge como uma alternativa viável para não somente minimizar o número de inspeções periódicas, mas também para maximizar os acertos referentes às inspeções programadas. Portanto, o monitoramento da integridade estrutural pode substituir a manutenção programada por uma manutenção efetuada quando realmente necessário, reduzindo assim, o custo de operação da aeronave e prevenindo manutenções não previstas, que são altamente indesejadas. No caso específico de estruturas em material compósito fabricadas em fibras de carbono e resina epóxi, pode-se projetar a mesma com a inclusão de sensores, por exemplo, fibras de Bragg. Tais fibras constituem assim, em um sistema que permite monitorar a integridade estrutural e pode auxiliar na identificação e localização de um dano, bem como, na previsão da extensão do mesmo. Portanto, o sistema SHM deve ser capazes de informar, a cada momento e durante a vida útil de uma estrutura, sobre o “estado” das diferentes partes ou do conjunto que constituem a estrutura como um todo. Esse “estado” da estrutura deve permanecer no domínio especificado no projeto, embora isso possa ser alterado pelo envelhecimento normal, provocado pelo uso, ação do meio ambiente e por eventos acidentais. Com base no histórico completo de eventos ocorridos, tem-se que o sistema SHM também pode fornecer um prognóstico do “estado” da estrutura, informando, por exemplo: a vida, a resistência e a rigidez residual. Assim, conhecer a integridade de estruturas em serviço e em tempo real é um objetivo muito importante para os fabricantes (equipes de projeto) e para os operadores (equipes de manutenção). Principalmente,

se a estrutura em estudo é fabricada em material compósito, pois, neste caso, a previsão dos mecanismos de dano e falha durante a etapa de projeto é extremamente complexa. Refira-se que as estruturas em material compósito apresentam não somente anisotropia, mas também heterogeneidade, acarretando assim em um processo de falha singular (Tita, 2003; Tita *et al.*, 2008).

Os sistemas de monitoramento da integridade estrutural (SHM) destacam-se pela variedade de técnicas, que podem ser adotadas e combinadas para melhor caracterizar o comportamento da estrutura. Por consequência, constata-se, assim, uma diversidade de estruturas e materiais desenvolvidos para monitorar os danos. Tais danos comprometem sensivelmente a segurança do voo e podem ser decorrentes do processo de envelhecimento das estruturas. Neste caso, o emprego de um sistema SHM permitiria fornecer um monitoramento contínuo da estrutura, prolongando a vida da mesma através do diagnóstico precoce de danos. Outro emprego extremamente estratégico para um sistema SHM consiste em monitorar regiões da aeronave cujo acesso é difícil. Trata-se muitas das vezes de elementos críticos de segurança estrutural, que durante inspeções programadas, requerem ampla desmontagem, acarretando um custo elevado da tarefa de manutenção. Sendo que tal aspecto é válido tanto para estruturas metálicas como estruturas em material compósito.

A simples instrumentação e desenvolvimento de novas técnicas de identificação impulsionaram o desenvolvimento nos últimos anos de sistemas SHM com base nas mudanças nas características de vibração da estrutura. Avanços importantes neste campo tem sido discutidos por Doebling *et al.* (1996); Salawu (1997); Doebling *et al.* (1998); Zou *et al.* (2000); Carden and Fanning (2004); Montalvão *et al.* (2006); Worden *et al.* (2008); Fan and Qiao (2011); Liu and Nayak (2012), que apresentaram revisões abrangentes sobre sistemas SHM.

Por outro lado, as técnicas de interferometria óptica têm sido largamente investigadas nas últimas quatro décadas, provaram ser ferramentas robustas e muito eficazes na inspeção não destrutiva de estruturas (Hung, 1997; Hung and Dahuan, 1998; Sirohi *et al.*, 1999; Gomes *et al.*, 2000; Santos *et al.*, 2004). As técnicas ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) e Shearografia (Speckle Shearography) são dois exemplos de interferômetros ópticos actualmente utilizados para a inspeção não destrutiva de estruturas em material compósito. Estas são técnicas de campo que permitem medir a informação sobre uma superfície e localizar facilmente as perturbações da sua resposta estrutural. O princípio da técnica Shearografia foi pela primeira vez demonstrado por Leendertz e Butters (1973) através da construção do interferómetro Michelson para medir a rotação numa superfície. A Shearografia é sensível ao gradiente dos deslocamentos fora-do-plano, pois o gradiente dos deslocamentos medido pode assumir-se como uma boa aproximação ao campo de rotações da superfície (Kreis, 2005). A detecção de danos com esta técnica é baseada na comparação de dois estados de deformação do objecto. Neste processo, diferentes métodos de excitação são usados dependendo do tipo de defeito e do material utilizado. A eficácia destas técnicas depende de vários factores, designadamente: características do material, natureza do defeito e método de excitação dos deslocamentos fora-do-plano. Na grande maioria dos casos, as fontes de excitação térmica, depressão ou impacto são as mais eficazes na localização de descolamentos interlaminares (Hung, 1997; Gomes *et al.*, 2000; Santos *et al.*, 2004; Ambu *et al.*, 2006; Araújo dos Santos *et al.*, 2006; Schmidt, 2009; Lasik *et al.*, 2011; Balamurugan and Muruganand, 2013).

No entanto, uma técnica global para a caracterização do dano em materiais laminados compósitos ainda não está estabelecida, devido à heterogeneidade do material e complexidade do problema. Por outro lado, as técnicas baseadas na análise das perturbações no campo de rotações e curvaturas têm avançado, como mostra Araujo et al. (2008), Lopes et al. (2011). Mais recentemente têm sido propostas derivadas de alta ordem para a localização do dano, Abdo (2012). Por outro lado as técnicas de medição de campo têm mostrado grande potencial na caracterização da resposta da estrutura, permitindo definir novas metodologias para a caracterização do dano estrutural.

Com base nestas ferramentas, diferentes trabalhos têm sido desenvolvidos por alguns dos autores do presente trabalho. Medeiros *et al.* (2012) estudou métricas e técnicas para o monitoramento de dano de uma viga encastrada-livre de alumínio. Medeiros *et al.* (2013) investigou a variação da resposta estrutural devido a presença de dano por impacto em estruturas cilíndricas de compósito. Medeiros *et al.* (2014a) estudou investigou juntas de compósito e titânio soldadas através dos métodos baseados em vibrações. Medeiros *et al.* (2014b) investigou o comportamento dinâmico de placas de compósito sujeitas ao dano provocado por carregamento de impacto. Neste trabalho apresenta-se uma metodologia experimental capaz de identificar, localizar e quantificar o dano em estruturas fabricadas em material compósito, através da combinação de diferentes técnicas. Primeiramente, métodos baseados na resposta vibratória são aplicados com objetivo de identificar a presença de dano na estrutura. Em seguida, buscou-se localizar e identificar a dimensão do dano, recorrendo à técnica ótica de Shearography Speckle (SS). Por fim, apresentam-se as vantagens e limitações da utilização de métodos baseados na resposta vibratória no contexto de SHM.

## MONTAGEM EXPERIMENTAL

As análises experimentais foram realizadas em 4 placas de material compósito. Sendo que duas apresentavam oito camadas empilhadas a  $[0]_8$  e duas com 12 camadas empilhadas a  $[0/15/-15/0/15/-15]_8$ . Os corpos-de-prova são fabricados em fibra de carbono e resina epóxi (CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polimer*). As placas possuem 305mm de comprimento 245mm de largura, sendo que as duas primeiras têm 2,25mm e as restantes 3,30mm de espessura, respectivamente. A Tabela 1 sumariza a matriz experimental desenvolvida neste trabalho.

Tabela 1 Descrição das placas

ID Placa	Sequencia Empilhamento	Tipo de Dano	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Espessura [mm]
<b>P01</b>	$[0]_8$	Impacto	305	245	2,25
<b>P02</b>	$[0]_8$	Impacto	305	245	2,25
<b>P03</b>	$[0/15/-15/0/15/-15]_8$	Impacto	305	245	3,30
<b>P04</b>	$[0/15/-15/0/15/-15]_8$	Impacto	305	245	3,30

Primeiramente, as frequências naturais e as Funções de Resposta em Frequência (FRFs) para estrutura intacta e danificada por impacto são obtidas usando 4 transdutores piezoelétricos (Fig. 1). O transdutor é do tipo MFC (*Macro Fiber Composite*) modelo M2814-P1, desenvolvido pela Smart Material Inc., o qual usa o modo d33 de piezeletricidade. Sabendo-se que o transdutor possui uma camada de fibra incorporada numa estrutura de polímero, o mesmo apresenta uma geometria total de 38mm de comprimento, largura de 20mm e 0,305mm de espessura. No entanto, devido ao encapsulamento, o mesmo tem uma geometria ativa de 28mm de comprimento e largura de 14mm. A excitação para os dois conjuntos de testes de vibração foi criada por meio de um sinal impulsivo gerado através do impacto de um martelo PCB Modelo 0860C3 (Piezotronics). A excitação foi realizada na posição 1 no lado de trás da placa.

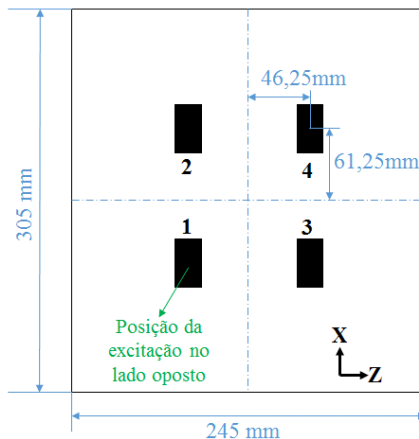


Fig.1 Representação esquemática da montagem experimental para análise de vibração

A Figura 2 mostra os equipamentos utilizados na montagem experimental. O corpo-de-prova é suspenso por dois fios elásticos com objectivo de simular uma condição próxima de livre-livre. O transdutor piezoelétrico e o martelo de impacto estão ligados ao equipamento de aquisição dinâmico de sinal LMS SCADAS Mobile, o qual é controlado pelo Software Test.Lab (LMS Test.Lab). Todo sinal registrado pelo equipamento consiste em 2048 pontos de amostragem para uma banda de frequências de 0-512 Hz. Além disso, para eliminar os efeitos de não linearidades e reduzir o ruído, os sinais são obtidos a partir de uma média aritmética de 5 registros para cada análise.

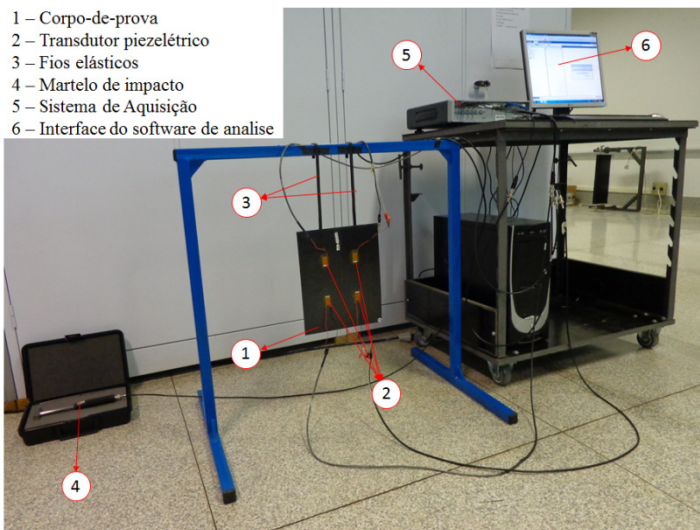


Fig.2 Montagem experimental para análise de vibração das placas

Após a análise da resposta vibratória, com o fim de determinar de forma mais precisa a presença, a localização e a extensão do dano na estrutura, procedeu-se à aplicação da técnica ótica de Shearography Speckle para localizar e quantificar o dano na estrutura. Neste caso, foi utilizada a técnica de modulação temporal de fase para aumentar a resolução da técnica e, assim, medir o mapa de fase correspondente ao campo de rotações produzido para um dado carregamento térmico. Para uma solicitação uniforme e na ausência de danos, a resposta na placa apresenta um comportamento uniforme para o campo de rotações, algo que não acontece na presença de dano. Esta descontinuidade de material ao longo da espessura manifesta-se através de uma perturbação na amplitude do campo de rotações nessa região, a qual resulta da expansão térmica e/ou da diminuição da rigidez à flexão da placa (Lopes, 2007).

Neste ensaio a placa é fixa numa das extremidades a um suporte de elevada rigidez e montada sobre uma mesa óptica da Newport® de modo a conferir maior estabilidade à montagem e à medição experimental (Fig. 3). O campo de rotações obtido pelo registro anterior e posterior à solicitação térmica é medido pelo sistema Shearografia, sendo o mapa de fase calculado recorrendo à técnica de modulação temporal de fase. A solicitação térmica é aplicada numa das faces da placa através do aquecimento da superfície durante 5 segundos com uma lâmpada de 500 W. Neste processo, a evolução das franjas correspondentes ao campo de rotações é acompanhada pela visualização em tempo real do mapa de interferência, obtido pela subtração entre a imagem capturada em cada instante (imagem da deformada) e a primeira imagem gravada (imagem de referência). O conjunto das imagens no tempo é processado através das técnicas de cálculo de fase e filtragem de fase.

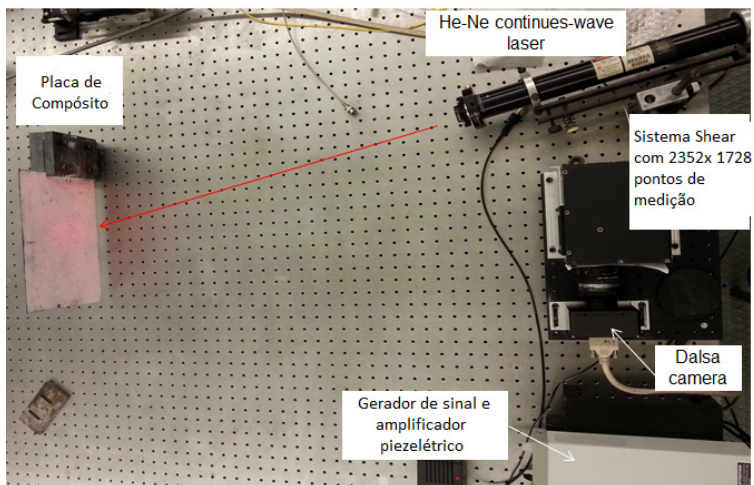


Fig.3 Montagem experimental da análise por Shearography Speckle.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 apresenta as diferentes frequências naturais medidas pelos transdutores piezoelétricos, sendo estas obtidas para as placas intactas e danificas. É possível observar que, para as placas 1 e 2, o segundo e o terceiro modo apresentam significativas diferenças nas frequências. Isto deve-se ao fato da presença do dano alterar a rigidez da estrutura nestes modos. Entretanto, para as placas 3 e 4, é possível observar que as mesmas não apresentam grandes variações. Tal comportamento pode ser explicado pela diferença de empilhamento do laminado.

Tabela 2 Frequências naturais obtidas experimentalmente para as placas intactas e danificadas

		$\omega_1$ [Hz]	$\omega_2$ [Hz]	$\omega_3$ [Hz]	$\omega_4$ [Hz]	$\omega_5$ [Hz]
Modo		1 <sup>st</sup> torsão	1 <sup>st</sup> flexão	2 <sup>nd</sup> torsão	2 <sup>nd</sup> flexão	3 <sup>rd</sup> torsão
Placa 1	Intacta	61,7	154,7	165,2	226,0	254,7
	Danificada	63,9	128,8	159,2	225,3	255,2
	Diferença relativa	3,57%	16,74%	3,63%	0,31%	0,04%
Placa 2	Intacta	58,4	147,8	156,7	224,9	250,7
	Danificada	62,2	121,5	148,8	222,6	249,8
	Diferença relativa	6,51%	17,79%	5,07%	1,02%	0,36%
Placa 3	Intacta	106,3	145,7	264,9	332,5	381,4
	Danificada	108,9	145,6	267,3	332,8	383,4
	Diferença relativa	2,45%	0,07%	0,91%	0,09%	0,52%
Placa 4	Intacta	107,5	147,4	267,6	332,7	384,1
	Danificada	110,8	147,6	270,2	333,3	387,5
	Diferença relativa	3,07%	0,14%	0,97%	0,18%	0,89%

As Figuras 4 e 5 apresentam as FRFs para a estruturas intacta e danificada, respectivamente. Sendo que os dados foram obtidos através dos transdutores piezoelétricos posicionados de acordo com a Fig. 1. É importante notar que  $H_{ij}$  indicam o ponto de aquisição dos dados ( $i$ ) e o ponto de excitação da estrutura ( $j$ ), evidenciados na Fig 1.

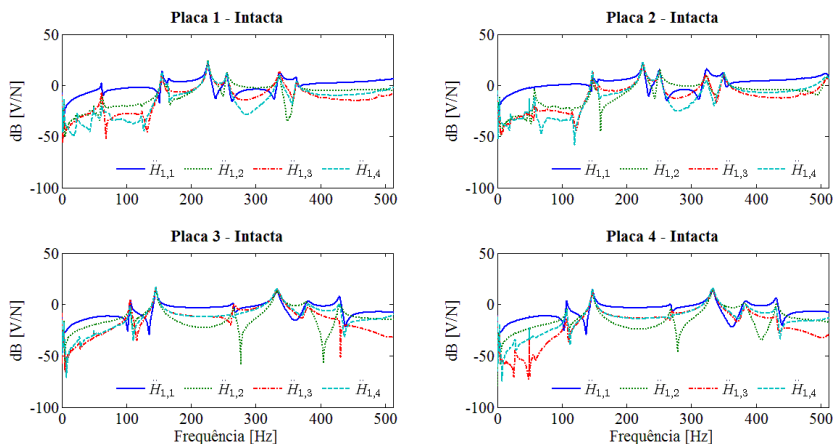


Fig.4 FRFs obtidas para as placas intactas através dos transdutores piezoelétricos



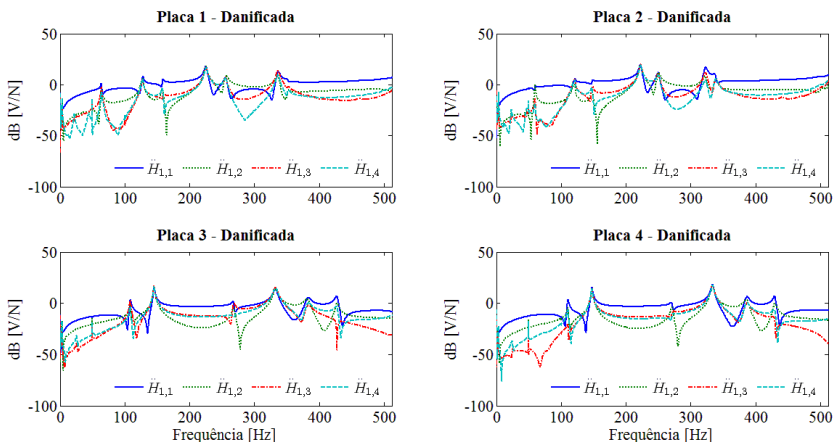


Fig.5 FRFs obtidas para as placas danificadas através dos transdutores piezelétricos

A Figura 6 apresenta, para as placas 1-4, a comparação entre a estrutura intacta e danificada para a posição 1, ou seja  $H_{11}$  (conforme Fig. 1).

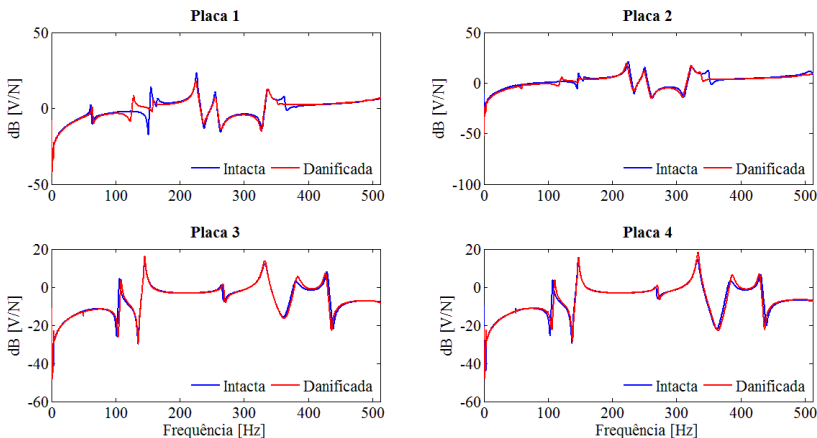


Fig.6 Comparação entre a estrutura intacta e danificada considerando  $H_{11}$

Considerando as frequências naturais e as FRFs apresentadas nas Fig. 4-6, é difícil concluir a partir de uma observação direta se a estrutura apresenta dano. Assim, foi necessário recorrer a uma métrica de dano, a qual foi proposta por Da Silva *et al.* (2008). Esta métrica é obtida pela análise da resposta em frequência a partir dos dados de entrada e saída. A métrica é um índice com base no desvio quadrático médio (RMSD). Este índice de dano foi inicialmente proposto para

o sinal de impedância elétrica, entretanto, no presente trabalho foi adaptado para ser utilizado em análise de vibração. A expressão indica que valores superiores a zero ocorrerão se houver alguma variação na resposta estrutural, e iguais zero se a estrutura não apresentar danos. A Tabela 3 apresenta os resultados para as diferentes placas e posições dos transdutores piezoelétricos. Nesta é possível observar que as placas com empilhamento a  $[0]_8$  apresentam um índice de dano mais elevado quando comparado com as placas com empilhamento  $[0/15/-15/0/15/-15]_8$ . Tal comportamento pode ser explicado pelo empilhamento do laminado, enquanto que nas placas a  $[0]_8$  tem um dano de matriz propagando-se ao longo das fibras na região de impacto. Nas placas com sequência de empilhamento  $[0/15/-15/0/15/-15]_8$ , o dano é concentrado na região de impacto.

Tabela 3 Índice de Dano

Placa	Intacta	Danificada			
		$H_{11}$	$H_{21}$	$H_{31}$	$H_{41}$
P01	0,00	0,3049	0,5147	1,1240	1,4743
P02	0,00	0,3364	0,4324	1,5299	2,6301
P03	0,00	0,0762	0,2162	0,1953	0,1906
P04	0,00	0,0971	0,1562	0,3114	0,2004

Após a verificação se a estrutura está danificada, o próximo passo é a aplicação da técnica shearografia para através da análise das perturbações no campo de rotações localizar e quantificar de forma aproximada a extensão do dano na estrutura. Os mapas de fase depois de filtrado obtido para uma solicitação térmica com gradiente  $\Delta x = 10\text{mm}$  podem ser observados nas Fig. 7 e 8.

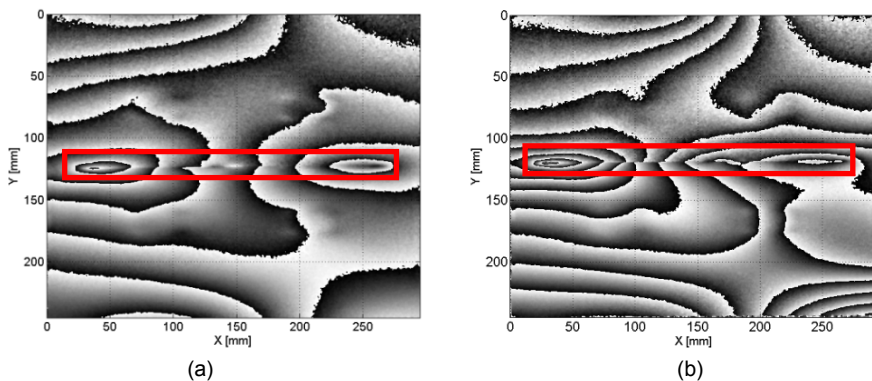


Fig.7 Mapa de fase  $\Delta x = 10\text{mm}$  obtido para (a) Placa 1 e (b) Placa 2

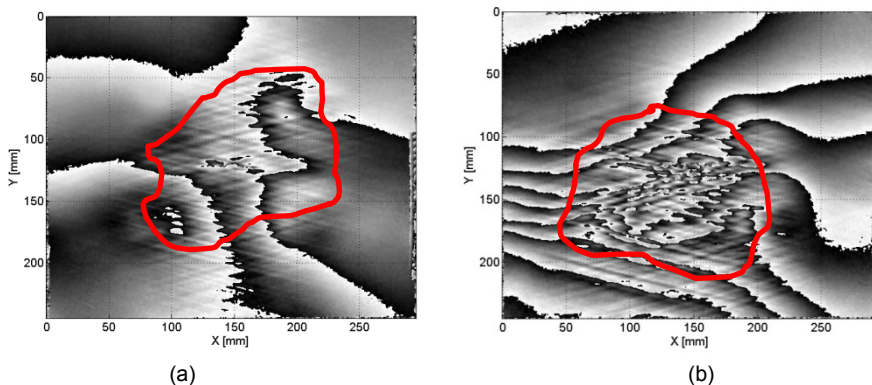


Fig.8 Mapa de fase  $\Delta x = 10\text{mm}$  obtido para (a) Placa 3 e (b) Placa 4

A análise dos padrões de franjas no mapa de fase da Fig. 7 revela a presença de um dano, coincidentes com a localização dos impacto. Assim como, a análise dos padrões de franja no mapa de fase da Fig. 8. É possível verificar que devida a sequência de empilhamento as placas 1 e 2 apresentaram dano ao longo da fibra. Enquanto as placas 3 e 4 apresentaram dano concentrado na região de impacto.

## CONCLUSÕES

Neste trabalho procurou-se desenvolver uma metodologia capaz de identificar, localizar e quantificar o dano em estruturas fabricadas em material compósito, através da combinação de diferentes técnicas experimentais. Primeiramente, utilizou-se a técnica baseada na análise das FRFs para identificar o dano na estrutura, em seguida utilizou-se a técnica ótica interferométrica para através da análise das perturbações no campo de rotações localizar e quantificar de forma aproximada a extensão do dano na estrutura.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a aplicação de métodos baseados nas FRFs permite de modo eficaz detectar o dano em placas de material compósito, desde que o mesmo seja combinado com o cálculo de métricas de dano. Este método tem a vantagem de ser facilmente implementado e apresentar um baixo custo. Além disso, o mesmo apresenta uma informação sobre o estado global da estrutura.

A técnica de Shearografia Speckle revelou-se muito eficaz na localização de danos de pequena dimensão, os quais muitas vezes não são detectados através de inspeção visual. Além disso, esta técnica pode realizar uma investigação rápida e traz outros benefícios, como o facto de realizar a medição sem contato e de campo. A técnica demonstrou ser uma boa alternativa para estimar danos em estruturas laminadas, principalmente para danos do tipo delaminação, ruptura da fibra e da matriz.

Portanto, a metodologia proposta baseada na resposta em frequência combinada com a técnica interferométrica de shearografia pode ser utilizada para detectar, localizar e, principalmente,

fornece uma estimativa da extensão dos danos em estruturas de material compósito, podendo vir a ser integrada a sistemas SHM.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP Processo n°. 2012/01047-8) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES Processo n°. 011214/2013-09) pelo financiamento do presente trabalho de pesquisa. Além disso, os autores agradecem, também, ao CNPq e a FAPEMIG pelo financiamento parcial através do INCT-EIE. Os autores gostariam de destacar que este trabalho também foi parcialmente financiado pelo Programa USP/UP, que é um acordo de cooperação científica estabelecida entre a Universidade do Porto (Portugal) e da Universidade de São Paulo (Brasil).

## REFERENCIAS

Abdo MAB. Damage detection in plate-like structures using High-Order mode shape derivatives. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 2012, 2, p. 801-816.

Ambu R, Aymerich F, Ginesu F, Priolo F. Assessment of NDT interferometric techniques for impact damage detection in composite laminates. *Composites Science and Technology*, 2006, 66, p. 199-205.

Araújo Dos Santos JV, Lopes HMR, Vaz M, Mota Soares CM, Mota Soares CA, De Freitas MJM. Damage localization in laminated composite plates using mode shapes measured by pulsed TV holography. *Composite structures*, 2006, 76, p. 272-281.

Araújo dos Santos JV, Maia NMM, Mota Soares CM, Mota Soares CA. Structural Damage Identification: A Survey. In: *Trends in computational structures technology*, Saxe-Coburg Publications. Editors: Topping BHV, Papadrakakis M, 2008, p.1-24.

Balamurugan R, Muruganand S. Digital image processing technique in Laser Speckle Pattern Interferometer for phase evaluation. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2013, 2, p. 560-562.

Carden EP, Fanning P. Vibration based condition monitoring: A review. *Structural Health Monitoring*, 2004, 3, p. 355-377.

Da Silva D, Dias Júnior M, Lopes Junior V. Structural health monitoring in smart structures through time series analysis. *Structural Health Monitoring*, 2008, 7, p. 231-244.

Doebling SW, Farrar CR, Prime MB, Shevitz DW. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review. Technical report, Los Alamos National Laboratory Report LA-13070-MS, Los Alamos, New Mexico, 1996.

Doebling SW, Farrar CR, Prime MB. A summary review of vibration-based damage identification methods. *Shock and Vibration Digest*, 1998, 30, p. 91-105.

Fan W, Qiao P. Vibration-based damage identification methods: A review and comparative study. *Structural Health Monitoring*, 2011, 10, p. 83-111.

Gomes JFS, Monteiro JM, Vaz MAP. NDI of interfaces in coating systems using digital interferometry. *Mechanics of Materials*, 2000, 32, p. 837-843.

Hung YY. Digital shearography versus TV-holography for non-destructive evaluation. *Optics and Lasers in Engineering*, 1997, 26, p. 421-436.

Hung YMY, Dahuan S. Technique for rapid inspection of hermetic seals of microelectronic packages using shearography. *Optical Engineering*, 1998, 37, p. 1406-1409.

Kreis T. *Handbook of holographic interferometry : optical and digital methods*. 2005, Weinheim: Wiley-VCH. xii, 542 p.

Lasyk L, Lukomski M, Bratasz L. Simple digital speckle pattern interferometer (DSPI) for investigation of art objects. *Optica Applicata*, 2011, 41, p. 687-700.

Leendertz, J, Butters JN. An image-shearing speckle-pattern interferometer for measuring bending moments. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1973. 6, p. 1107-1110.

Liu Y, Nayak S. Structural health monitoring: State of the art and perspectives. *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2012, 64, p. 789-792.

Lopes HMR. Desenvolvimento de técnicas interferométricas, contínuas e pulsadas, aplicadas à análise do dano em estruturas compósitas. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2007.

Lopes HMR, Araújo dos Santos JVA, Mota Soares CM, Guedes RJM, Vaz MAP. A numerical-experimental method for damage location based on rotation fields spatial differentiation. *Computers & Structures*, 2011, 89, p. 1754-1770.

Medeiros R, Sartorato M, Ribeiro ML, Vandepitte D, Tita V. Numerical and experimental analyses about SHM metrics using piezoelectric materials. In: *International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2012)*, Leuven, Belgium, 2012.

Medeiros, R, Ribeiro ML, Tita V. Computational methodology of damage detection on composite cylinders: Structural health monitoring for automotive components. *International Journal of Automotive Composites*, 2014, 1, p. 112-128.

Medeiros R, Flor FR, Ribeiro ML, Tita V. Impact damage quantification in composite cylinders using computational and experimental techniques. In: *VIII National Congress of Mechanical Engineering (CONEM2014)*, Uberlândia, Minas Gerais, Brazil, 2014a.

Medeiros R, Sartorato, Vandepitte D, Tita V. SHM of composite plates: Vibration based method by using PZT sensors. In: *International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2014)*, Leuven, Belgium, 2014b, p.3811-3826.

Montalvão D, Maia N, Ribeiro A. A review of vibration-based structural health monitoring with special emphasis on composite materials. *Shock and Vibration Digest*, 2006, 38, p. 295-324.

Salawu O. Detection of structural damage through changes in frequency: a review. *Engineering Structures*, 1997, 19, p. 718-723.

Santos F, Vaz M, Monteiro J. A new set-up for pulsed digital shearography applied to defect detection in composite structures. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 42, p. 131-140.

Schmidt A. Experimental investigations on nondestructive testing methods for defect detection with double-pulse electronic speckle pattern interferometry, Ph.D. Thesis, Faculty of Mechanical Engineering, Helmut-Schmidt-University / University of the Federal Armed Forces Hamburg, Hamburg, Germany, 2009.

Sirohi RS, Tay CJ, Shang HM, Boo WP. Nondestructive assessment of thinning of plates using digital shearography. *Optical Engineering*, 1999, 38, p. 1582-1585.

Tita V. Contribuição ao estudo de danos e falhas progressivas em estruturas de material compósito polimérico. Tese doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2003.

Tita V, De Carvalho J, Vandepitte D. Failure analysis of low velocity impact on thin composite laminates: Experimental and numerical approaches. *Composite Structures*, 2008, 83, p. 413-428.

Worden K, Farrar CR, Haywood J, Todd M. A review of nonlinear dynamics applications to structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*, 2008, 15, p. 540-567.

Zou Y, Tong L, Steven G. Vibration-based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures a review. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 230, p. 357-378.