A AVALIAÇÃO DO DANO EM MATERIAIS COMPOSITOS LAMINADOS E A INVESTIGAÇÃO NO LOME (FEUP) E NO CEMUC (FCTUC)

N. F. Rilo *, M. A. Vaz §, J. F. Silva Gomes §, R. C. Pereira Leal *, J. M. Sousa Cirne *

* CEMUC, Centro de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra
http://www.centauro.dem.uc.pt

§ LOME, Laboratório de Métodos Ópticos e Mecânica Experimental
http://www.fe.up.pt

SUMÁRIO

No processo de fabrico de componentes estruturais em materiais compósitos, no seu manuseamento e em condições de serviço, podem ocorrer fracturas na matriz, descolagens entre as fibras e a matriz, fracturas das fibras ou delaminações causadoras de perda de rigidez e de resistência. Neste artigo dá-se conta dos esforços de investigação, que têm acompanhado a vulgarização crescente do uso de materiais compositos, no sentido de criar sistemas fiáveis de inspecção e controlo capazes de identificar a presença de dano, localizá-lo e avaliar a sua extensão. Procurando sistematizar as metodologias de avaliação do dano, apresentam-se os principais trabalhos desenvolvidos e em curso pelos investigadores do LOME da FEUP e do CEMUC da FCTUC. Estas duas unidades de investigação têm coordenado as suas linhas de investigação no desenvolvimento de métodos experimentais por interferometria holográfica e na sua combinação com a modelação numérica por elementos finitos e optimização.

1 – INTRODUÇÃO

Os recentes avanços na produção de componentes mecânicos em materiais compósitos com fibras de alta resistência, recorrendo a novas tecnologias de fabrico a custos reduzidos, tornaram possível a vulgarização do seu uso numa grande variedade de equipamentos e produtos de consumo. Tal facto permitiu generalizar a utilização de materiais até há pouco só aplicados no fabrico de estruturas para as indústrias aeronáutica e aeroespacial.

Os componentes fabricados a partir de materiais compósitos são muito susceptíveis a impactos casuais, produzidos em condições de serviço ou durante o seu manuseamento, causadores de eventuais danos e consequente perda de rigidez e resistência. Por este motivo, o desenvolvimento das tecnologias de produção destes materiais têm sido acompanhadas de um esforço para criar sistemas de inspecção e controlo, capazes de identificar o dano no seu estágio inicial,

localizá-lo e prever o tempo de vida remanescente desses componentes.

É sabido que o comportamento à fractura deste tipo de materiais é significativamente diferente e mais complexo que o dos materiais homogéneos e isotrópicos. A perda de integridade estrutural em estruturas compósitas está estritamente ligada ao tipo e distribuição dos danos, assim como ao modo de carregamento. Este campo de investigação é complexo e envolve metodologias locais e globais que combinam técnicas experimentais e simulações analíticas e numéricas. Existe contudo uma dificuldade na modelação matemática do dano e na eventual fractura dos componentes mecânicos em materiais compósitos, devido às diferentes escalas geométricas envolvidas na iniciação e progressão do dano.

A par de aplicações de compósitos em componentes com baixas exigências de projecto, há estruturas que devem obedecer a critérios exigentes de projecto e materiais complexos de alta resistência que acumulando muitas horas de serviço e requerendo técnicas não experimentais que garantam a sua integridade em serviço e que permitam a sua manutenção, incluindo reparações, de forma fiável.

Alguns dos métodos de inspecção são adaptações de técnicas de avaliação usadas anteriormente na inspecção de componentes metálicos [1]. Os novos métodos procuram responder às necessidades especificas dos materiais compósitos. De momento alguns deles são apenas aplicáveis em laboratório, mas outros já estão preparados para aplicações industriais.

Os métodos não destrutivos, combinados com modelações numéricas por elementos finitos, representam tecnologias adequadas para avaliar o desempenho em serviço e a existência de defeitos na produção. Diversos programas de investigação têm procurado desenvolver novos sistemas deste tipo capazes de auxiliar no reconhecimento e na distribuição de defeitos.

Um sistema completo de detecção de defeitos, deve **detectar** a existência do dano no seu inicio (**nível I**), **localizá-lo** (**nível II**), fornecer uma **estimativa** da sua severidade (**nível III**) e eventualmente **prever** o tempo de vida remanescente do componente (**nível IV**). Esta classificação em quatro níveis proposta por Rytter [2] em1993 é esclarecedora e útil como metodologia.

Os trabalhos desenvolvidos e em curso no LOME e no CEMUC situam-se nos três primeiros níveis que relacionam mais estreitamente os testes experimentais e a sua modelação numérica. O último nível, de previsão, está mais relacionado com a mecânica da fractura e a resistência à fadiga.

Sobre os trabalhos de investigação efectuados nesta área é possível encontrar uma revisão bibliográfica muito completa e actualizada no relatório do Laboratório Nacional de Los Alamos (EUA), *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in their Vibration Characteristics. A Literature Review* [3]. A tabela incluída nesta referência apresenta uma lista de trabalhos de investigação sobre sistemas de avaliação não destrutivos e procura ajudar na sua selecção para uma aplicação determinada. Não sendo uma listagem exaustiva e definitiva é um guia geral da aplicação das diferentes tecnologias às várias condições dos componentes e materiais. São apresentados cronologicamente e classificadas 137 publicações sobre identificação e avaliação do dano por alteração de características vibratórias, de acordo com as grandezas medidas, a formulação do problema, critérios de optimização e as propriedades utilizadas.

A necessidade de ir mais longe na detecção de danos mais profundos em estruturas complexas conduziu a investigação para metodologias mais elaboradas, combinando medidas experimentais e análises numéricas, de que são de destacar as que recorrem ás alterações das características de vibração das estruturas. A ideia central destes métodos reside no facto dos parâmetros dinâmicos de um corpo, particularmente as frequências e

os modos de vibração, dependerem de propriedades físicas, como a massa, a rigidez e o amortecimento, de tal modo que as alterações destas provocarão variações naquelas.

Tendo em atenção a grandeza usada para identificar o dano, podemos agrupar os métodos da seguinte forma:

- *alteração das frequências*
- *alterações nos modos de vibração*
- *alterações nos modos de deformação/curvatura*
- *medições dinâmicas de flexibilidade*
- *modificações das matrizes de massa, rigidez ou amortecimento*

Há uma grande variedades de técnicas experimentais não destrutivas que usam *ultra-sons, raios x, infravermelhos, campo magnético, correntes de Eddy, distribuição de temperaturas ou interferometria holográfica* que podem ser integradas em metodologias de avaliação de componentes estruturais de materiais compósitos. De entre estes métodos de inspecção os mais usados são os ultra-sons e as radiografias e com eles podem-se detectar e caracterizar muitos tipos de descontinuidades. A interferometria holográfica, e em particular a shearografia, e os raios infravermelhos são técnicas que não exigem contacto, abrangem grades áreas e têm boa sensibilidade a descontinuidades próximas da superfície. A aplicação destas técnicas está em crescimento, particularmente onde os métodos tradicionais encontram dificuldades e ambas oferecem imagens de fácil interpretação.

A tabela I da referência [5], oferece um resumo das principais técnicas experimentais não destrutivas e das respectivas aplicações e constitui um guia geral para a escolha do método experimental adequado a cada situação especifica do material e da estrutura.

Tabela I. Sumário da aplicabilidade das técnicas não destrutivas,[5].

Flaw Type	*Visual*	*Tap test*	*UT through-transmission*	*UT pulse-echo*	*UT polar backscatter*	*UT resonance*	*UT correlator*	*X-radiography*	*X-ray backscatter*	*Computed tomography*	*Neutron radiography*	*Acoustic emission*	*Acousto-ultrasonics*	*Eddy currents*	*Thermal IR*	*Shearography*	*Microwave*
Porosity			1	1	2		2	1		1	1		2				2
Foreign material	3		2	1	2	2	2	2	2	2	2				2	3	
Shallow delamination		2	1	1	2	1	1		1	1		3	2		1	1	
Deep delamination			1	1	3	3	1		1	1		3			2	2	
Matrix cracks	3				1			1		2		2	1		3		2
Fiber breaks								2		2		2	2	1			1
Impact damage	3	2	1	1	2	2	1	2	2	1		3	2	1	1	1	1
Skin/skin disbond	3	2	1	2		1	1	2	1	2	2	2	3		1	1	
Skin/core disbond		3	1	2		2	1	3		3	2	2			1	1	
Crushed core			1	3			1	1		2					2	2	
Condensed core								1		1							
Blown core			1				1	1		1							
Core node disbonds								1		1							
Water intrusion			3	2			3	2		2	1	2			2		
Corroded core			2				2	2		3	1	3					
Fatigued core			2				2	1		2							
Foam adhesive voids							3	2		1	2						
Bondline adhesive voids			1	2		1	1	2	2	2	1				2	1	

Key:
1. Good sensitivity and reliability. Good candidate for primary method.
2. Less reliability or limited applicability. May be good supplementary method.
3. Limited applicability. May provide some useful information.

2 – A INTERFEROMETRIA HOLOGRÁFICA NA ANÁLISE DE COMPÓSITOS LAMINADOS

Na última década assiste-se ao desenvolvimento de métodos experimentais não destrutivos, em particular da interferometria holográfica, que, associados ao método dos elementos finitos, trouxeram outras possibilidades e rigor à investigação. Estas técnicas, bem conhecidas desde os anos sessenta, tiveram um grande incremento nos anos mais recentes associadas ao desenvolvimento dos meios computacionais e das técnicas de processamento de imagem. Uma vantagem destes métodos híbridos não destrutivos reside no facto da grandeza ser avaliada num campo, que pode ser o corpo todo, e não ponto a ponto como é, por exemplo, o caso da extensometria eléctrica.

Por exemplo, na Teoria Clássica de Placas Laminadas conduz à seguinte relação

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}\boldsymbol{\varepsilon}^0 + \mathbf{B}_k + \mathbf{d}^N$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{B}\boldsymbol{\varepsilon}^0 + \mathbf{D}_k + \mathbf{d}^M$$

onde **A**, **B** e **D** são as conhecidas matrizes de rigidez de extensão, ligação extensão-flexão e flexão de uma placa laminada sem defeitos e os vectores $\mathbf{d}^N$ e $\mathbf{d}^M$ são os vectores dos defeitos relativos às forças e momentos resultantes. Estes vectores são dados por

$$\mathbf{d}^N = -\sum_{k=1}^{N}(z_k - z_{k-1})\,\overline{\mathbf{Q}}_k\,\overline{\boldsymbol{\alpha}}_k$$

$$\mathbf{d}^M = -\sum_{k=1}^{N}(z_k^2 - z_{k-1}^2)\,\mathbf{Q}_k\,\boldsymbol{\alpha}_k$$

sendo $\mathbf{Q}$ a matriz transformada das constantes de rigidez da lâmina k e $\boldsymbol{\alpha}_k$ o vector das variáveis internas de estado de dano (ISVs) transformada.

Nos componentes laminados convencionais, a rigidez à flexão e torção – (D_{11}, D_{12}, D_{22},) e (D_{66}) – podem ser calculados de acordo com a regra das misturas usando os módulos de elasticidade da matriz e da fibra constituintes e as fracções volúmicas de cada um ou de acordo com a teoria clássica de laminados, usando o modelo de elasticidade do agregado. Contudo, alguns componentes laminados sofrem transformações no seu processo tecnológico de produção que tornam a regra das misturas desadequada pelo que as propriedades do conjunto devem ser avaliadas directamente.

Assim, trabalhos recentes [8], propõem a interferometria halográfica para medir directamente os módulos de rigidez á flexão (D_{11}, D_{12}, D_{22}) e torção (D_{66}) dos agregados compósitos, bem como os diversos módulos de rigidez (E_1, E_2, G_{12}) e o coeficiente de Poisson (ν_{12}) de laminas compósitas ortotrópicas [9]. Outros trabalhos [10,11,12] procuram associar métodos experimentais com o método dos elementos finitos e optimização na identificação de propriedades mecânicas situando-se assim numa área muito próxima da avaliação do dano.

No trabalho de investigação *"Análise Dinâmica de Placas Compósitos Laminadas por Interferometria Holograma e Elementos Finitos"*, [17] , Nuno Peixinho determina o modulo de rigidez à torção no plano, G12, de uma placa laminada compósito num teste de ressonância como uma viga em consola e usando interferometria holográfica.

Este trabalho mostra, como se pode observar na figura 2, que a interferometria holográfica constitui uma técnica experimental fiável na avaliação das propriedades mecânicas de materiais compósitos confirmando os bons resultados obtidos por Teresa Martins [18] que no trabalho *"Caracterização de Ortotropia em Placas de Epóxido Carbono Utilizando Técnicas Interferométricas"* aferiu resultados obtidos por elementos finitos com testes experimentais.

Na sequência destes trabalhos, os elementos deste grupo de investigação estão agora em condições de passar à identificação de defeitos em placas compósitas começando por comparar as propriedades medidas em placas sem dano com as de placas onde serão produzidos defeitos.

3 – O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NAS METODOLOGIAS DE IDENTIFICAÇÃO DO DANO EM COMPÓSITOS LAMINADOS.

3.1- Identificação do dano por alteração das frequências próprias e modos de vibração

A observação de variações nas frequências de vibração das estruturas devido a alterações das suas propriedades estruturais é vulgar e constitui a primeira razão para o seu uso na identificação do dano e monitorização da integridade de componentes estruturais em geral.

É comum dividir os problemas que usam o conhecimento das frequências em **Problemas Directos** e **Problemas Inversos**. Os primeiros, consistem em calcular as frequências de um tipo de defeitos conhecido. Tipicamente, o dano é modelado matematicamente por elementos finitos

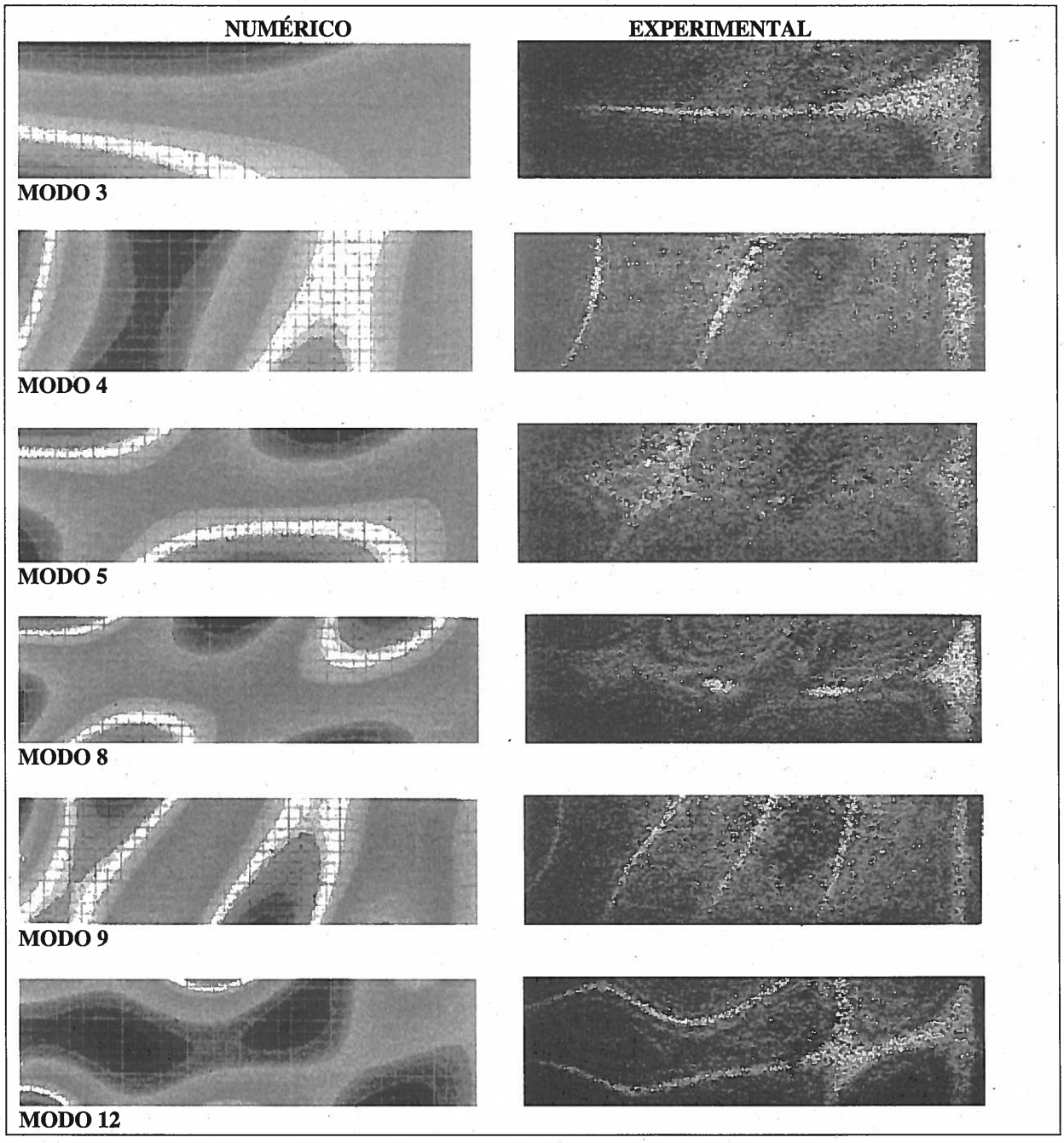
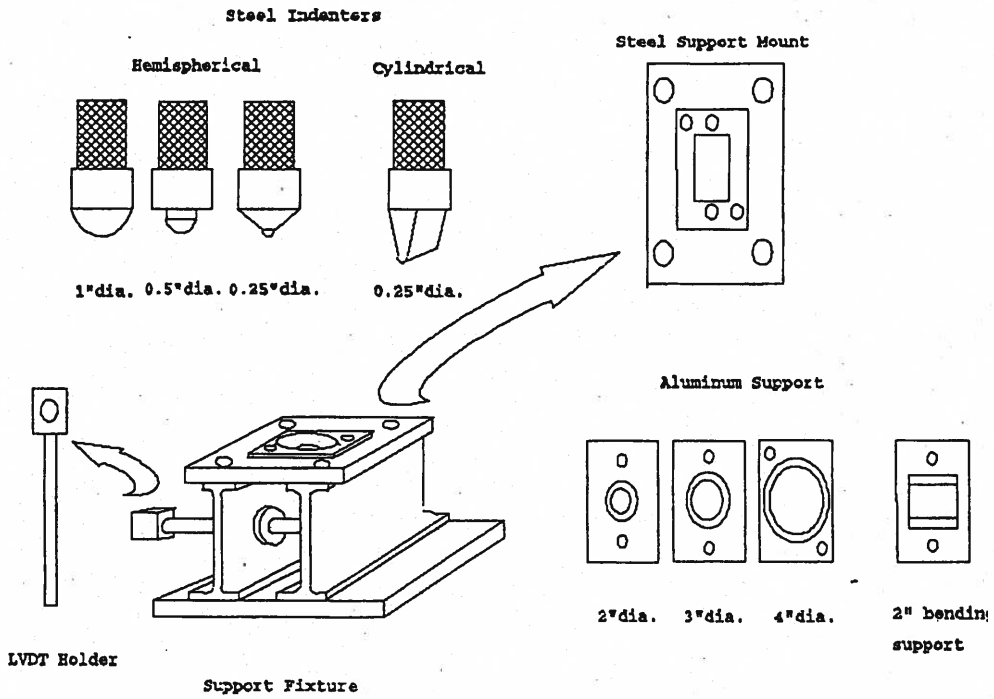
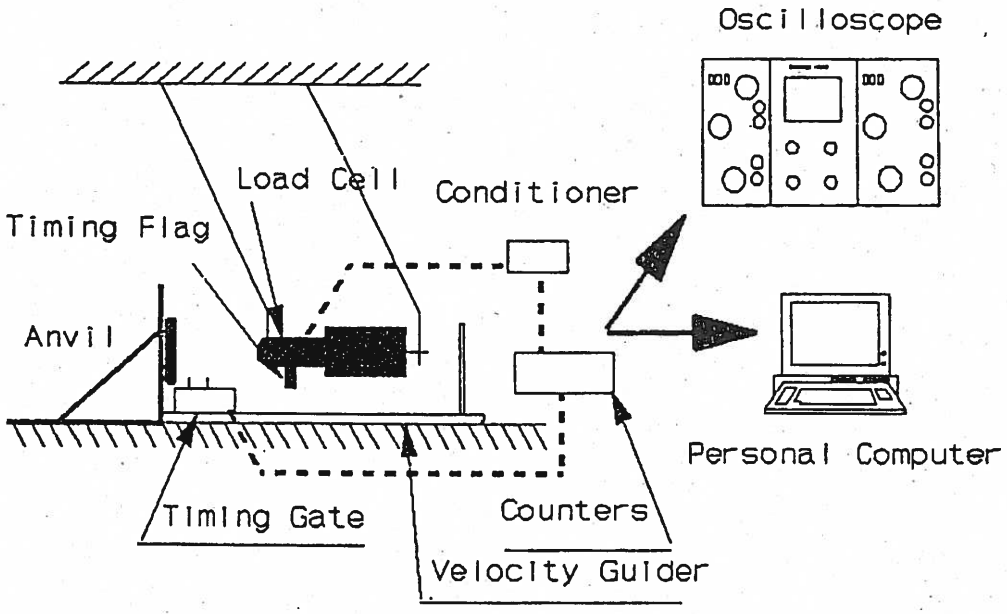


Fig. 1.- Modos de vibração de uma placa em consola obtidos por elementos finitos no programa COSMOS e experimentalmente por interferometria holográfica [7]



(a)



(b)

Fig. 2 - Sistema de fixação dos provetes e dos identadores (a) e diagrama esquemático do pêndulo (b) usados por Kwon e Sankar [26] nos ensaios de identação e de impacto.

as frequências medidas são comparadas com as previstas para determinar o dano. Esta comparação permite a actualização do modelo numérico que, posteriormente, pode ser usado na identificação de defeitos em casos semelhantes. Nos problemas inversos, procura-se determinar os parâmetros de dano como, por exemplo, o comprimento das fendas ou a sua localização a partir das variações das frequências.

Sendo as frequências modais uma propriedade global da estrutura, as suas alterações servem essencialmente para identificar a mera presença de defeitos na estrutura situando-se no primeiro nível de avaliação do dano. De facto, as frequências não conseguem geralmente dar informação sobre a localização do dano, excepto em frequências modais altas, onde os modos estão associados a respostas localizadas mas onde, existem dificuldades praticas de excitar as componentes devidas à elevada densidade modal.

A literatura sobre este tema é muito vasta e abrange diversas aplicações pelo que aqui vamos referir apenas trabalhos mais recentes aplicados a materiais compósitos.

Como primeiros trabalhos que consideramos relevantes podemos referir os de Lifshitz e Roten [4] (1969), Shultz e Warwick [6] (1971) e Adams e outros [7] (1975). Pela limitação dos meios experimentais e de computação da altura, nestes trabalhos procura-se avaliar a sensibilidade dos diversos parâmetros dinâmicos, como frequências de vibração ou o amortecimento à existência de defeitos.

A opção entre o uso das frequências ou dos modos de vibração como parâmetros de avaliação do dano continua a ser um problema recorrente nos mais recentes trabalhos de investigação. Se olharmos para um vasto número de trabalhos significativos, como os da referência [3], podemos constatar que a opção por um destes parâmetros é variável com o problema em estudo, os meios experimentais disponíveis e o objectivo do trabalho. Porém, pode afirmar-se que a análise modal é mais adequada para a localização e quantificação do dano. Refira-se como um trabalho recente e relevante o método apresentado por Araújo dos Santos e outros [40] *"Damage Identification of Composite Structures: A Numerical Model"*. Através da análise de sensibilidades e das condições de ortogonalidade dos modos de vibração, os autores formulam um algoritmo para calcular um parâmetro de dano em cada elemento finito.

Para o estudo de materiais compósitos pelo método dos elementos finitos, o Grupo de Mecânica Estrutural do CEMUC e os Investigadores do LOME dispõem de um bom grupo de programas desenvolvidos pelos próprios e de programas comerciais destinados à análise de componentes por elementos finitos de placa, casca e sólidos tridimensionais em materiais compósitos.

Além dos programas COSMOS e ADINA criaram-se programas próprios com elementos de placa compósitos em estática e dinâmica, [13][14], adaptaram-se os elementos de placa do programa MODULEF para tratar compósitos, [15], e desenvolveu-se um novo elemento de casca compósita (TRIA DSTP) neste programa [16].

3.2 – Avaliação contínua do dano

A abordagem do dano pela sua relação com as alterações das relações constitutivas dos compósitos laminados vem sendo objecto de investigação há alguns anos [19,20]. Porém, alguns dos modelos propostos exigem um grande numero de calibrações das constantes das relações constitutivas com resultados experimentais, tornando-os pouco atractivos.

Tay e Lim [21], propuseram recentemente uma variação da teoria continua do dano, primeiro apresentada por Kachanov [19], e mais tarde aplicada por Allen *et al.*, [20] e Talreja [22], a materiais compósitos, que não requer numerosas nem difíceis calibrações experimentais. De facto, pode mostrar-se, [21,23], que o estado de dano se pode descrever adequadamente por variáveis internas de estado, (IVSs), obtidas através de séries de estudos paramétricos por elementos finitos.

Por outro lado, esta teoria baseada em mecânica continua do dano pode ser facilmente incorporada no método dos elementos finitos [24,25].

Matematicamente, a relação tensões-deformações geral de um material compósito com defeitos pode escrever-se na forma seguinte,

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\,\varepsilon_{kl} + I^{\eta}_{ijkl}\,\alpha^{\eta}_{kl}$$

onde σ_{ij} são as tensões, C_{ijkl} são as constantes elásticas do material sem defeitos, ε_{kl} são as deformações, I^{η}_{ijkl} são os elementos da matriz do dano, α^{η}_{kl} são as variáveis internas de estado e $\eta = 1,2,3, \ldots$, são diversos modos de fractura e dano. Estas variáveis podem portanto ser vistas e tratadas como deformações.

Pode-se mostrar que para fracturas na matriz, [24], a relação

$$I^{\eta}_{ijkl} \approx C_{ijkl}$$

constitui uma boa aproximação. A sua consideração simplifica consideravelmente a relação constitutiva anterior que pode ser usada numa teoria de placas laminadas.
Formulando o problema pelo método dos elementos finitos, chegamos a um sistema de equações algébricas do tipo

$$\mathbf{K}\,\mathbf{d} = \mathbf{f} + \mathbf{f}^{d}$$

onde, relativamente a um problema clássico em estática, surge o vector $\mathbf{f}^{d}$ no segundo membro que podemos designar por vector de forças de dano e que se pode determinar a partir de valores nodais das variáveis internas de estado α e de um critério adequado de dano. Por sua vez, para a sua determinação, [21,23], pode recorre-se a estudos paramétricos de grandezas cinemáticas de fendas, como o conhecido parâmetro COD, obtidas por elementos finitos.

A resolução do sistema de equações através de um algoritmo iterativo onde a carga exterior é aplicada gradualmente, permite assim simular a evolução e distribuição do dano num componente estrutural.

O Grupo de Mecânica Estrutural do CEMUC iniciou contactos com o Prof. T. E. Tay da Universidade de Singapura no sentido de estabelecerem colaboração para instalar no programa Modulef um algoritmo de avaliação do dano por este método.

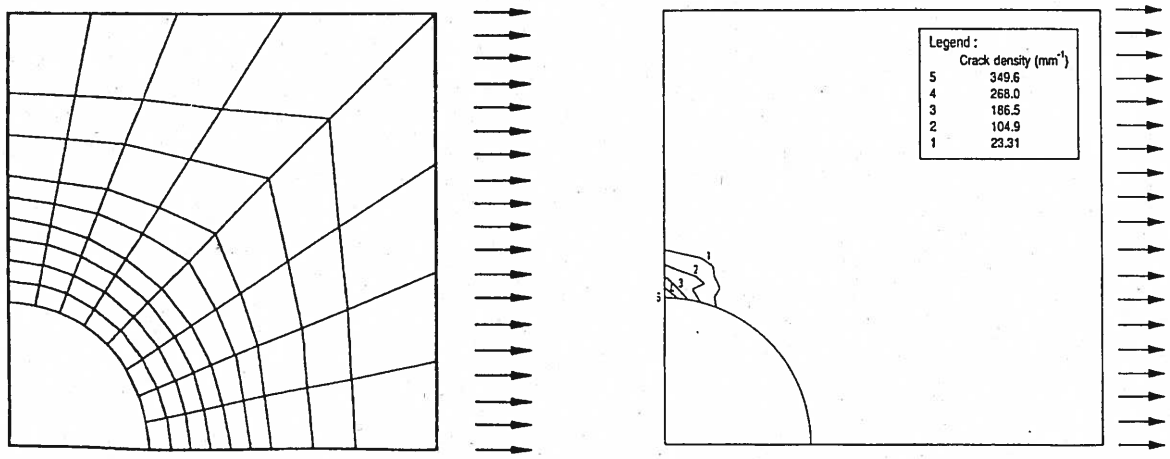


Fig. 3 Malha de elementos finitos e densidade de distribuição de fendas na camada 90° de um laminado [90°/0°]s segundo a referência [25]

3.3 – Modelação do Impacto

Já referimos a sensibilidade da generalidade dos materiais compósitos ao choque. O dano causado pelo impacto é responsável por defeitos no material, alteração da distribuição interna das forças, diminuição da capacidade de carga e rotura por alteração local do campo de tensões.

É vulgar, [26], dividir o impacto em duas categorias:

- *impacto de alta velocidade*, caracterizado por uma solicitação transitória localizada que pode causar perfuração,
- *impacto de baixa velocidade*, onde a massa de impacto é grande e a velocidade baixa. Estes impactos ocorrem tipicamente no manusea-

mento dos componentes e por objectos que caem, acidentalmente ou em serviço, sobre estruturas compósitas.

Sankar e outros [27] mostraram que para grandes massas (1-15 Kg) e baixas velocidades de impacto (0-3 m/s), a duração do impacto é varias ordens de grandeza maior do que o tempo de percurso das ondas de flexão entre as fronteiras do alvo e que por isso pode ser analisado como um fenómeno quase-estático.

Este procedimento de análise usado pela generalidade dos investigadores, como por exemplo Moura [28], é comprovado no trabalho de Kwon e Sankar [26] de 1992 para a NASA. Estes autores procederam a duas séries de testes usando diferentes tipos de laminados de grafite-epóxi. Numa série de experiências registaram as curvas carga-deflexão de testes estáticos de idêntação e avaliaram o dano causado por C-Scanning, ultra-sons e fotomicrografia. Noutro conjunto de experiências realizaram testes de impacto a baixa velocidade em que registaram a historia da força de impacto e a curva carga-deflecção e o dano foi quantificado pelas mesmas técnicas.

A análise comparativa dos resultados dos dois tipos de testes permitiu-lhes concluir que os resultados estáticos podem ser usados para prever o dano em pestes de impacto a baixa velocidade.

A modelação por elementos finitos de um impacto a baixa velocidade pode fazer-se por quatro tipos diferentes de procedimentos de análise:

I – *análise linear estática*

II – *análise não linear estática*

III – *análise transitória linear*

IV – *análise transitória não linear*.

Em análises estáticas lineares (I), a carga máxima constitui o segundo membro de um sistema de equações algébricas lineares que se pode resolver por um dos métodos habituais.

Nos procedimentos de análise não lineares estáticos (II), a carga é aplicada de forma incremental e em cada incremento de carga resolve-se um sistema de equações algébricas não lineares usando, por exemplo, o método de Newton-Raphson.

A modelação de solicitações dinâmicas transitórias, lineares e não lineares, (III e IV), sobre um corpo através de uma discretização espacial por elementos finitos e no tempo por diferenças finitas, conduz invariavelmente a um conjunto de equações da forma:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}}+\mathbf{C}\dot{\mathbf{d}}+\mathbf{K}\mathbf{d}=\mathbf{F}(t)$$

onde os pontos significam derivadas em ordem ao tempo, a são deslocamentos nodais, **M** é a matriz massa, **C** é a matriz de amortecimento, **K** é a matriz de rigidez e **F** o vector das forças externas sobre a estrutura.

A resolução deste sistema de equações faz-se por sucessivas aproximações em pequenos intervalos de tempo recorrendo a uma variedade de métodos habitualmente agrupados em implícitos e explícitos.

A força de impacto aplicada **F(t)** pode ser avaliada em cada instante de tempo por um modelo teórico de contacto [29] ou experimentalmente [26]. A modelação completa do fenómeno por discretização espacial do objecto de impacto e da estrutura que corresponde à formulação de um problema de contacto entre corpos, não foi colocada nesta fase do trabalho.

O tipo de elementos usados na simulação numérica depende do nível de detalhe pretendido com o modelo. Os elementos geralmente empregues na modelação são elementos sólidos tridimensionais e elementos de placa-casca.

Nos modelos com elementos sólidos, cada fibra pode ser representada por uma ou várias filas de elementos sólidos com as propriedades da fibra formando com a matriz um modelo de duas fazes. Pode assim analisar-se a descolagem das fibras, fracturas dos materiais, avanço das fendas e simular testes experimentais ou delaminações e esmagamentos de componentes mais ou menos complexos em materiais compósitos.

Os elementos de placa-casca de materiais compósitos, modelados com a

camada única equivalente por um processo de homogeneização ou como elementos de multicamada, são eficientes na simulação global de componentes e conjuntos estruturais como, por exemplo, análises de choques de veículos.

O estudo de descontinuidades entre camadas diferentemente orientadas num material compósito ou a análise de juntas adesivas, exige o conhecimento rigoroso das tensões normais e de corte nas interfaces. Com esse objectivo, diversos autores desenvolveram elementos com características especificas chamados elementos de interface cuja descrição podemos encontrar no trabalho de Beer [30] enquanto nos trabalhos [31-35] encontramos diversas aplicações.

Por sua vez, o dano no material pode ocorrer por múltiplas fracturas na matriz e rotura e descolagens de fibras com complexas interacções entre elas. A avaliação da sua extensão em modelações por elementos finitos pode fazer-se começando por calcular as tensões e incorpora-las num critério de cedência apropriado como, por exemplo, o critério de cedência polinomial proposto por Tsai e Hahn [36].

Qualquer das análises deste tipo pode ser feita por um código comercial genérico de elementos finitos como o COSMOS, ABACUS, ADINA ou no MODULEF. Como exemplos de trabalhos destes, queremos referir os trabalhos de Lakshminarayana e outros [37,38].

Porém, a modelação de fendas na interface de camadas com propriedades físicas diferentes ou com orientações diferentes, como em juntas adesivas ou em materiais compósitos, exige uma formulação mais complexa. Então, recorre-se geralmente a elementos finitos de interface que podem ser desenvolvidos por diversos métodos de que se destacam o método dos multiplicadores de Lagrange e o método das funções de penalidade.

Estes elementos, de espessura nula, fazem a interligação entre os elementos convencionais e simulam as propriedades da ligação. As restrições de interpenetração ponto a ponto equivalem à formulação de um problema de contacto que, pelo método das funções de penalidade, em estática resulta num problema não linear do tipo

$$\left[\mathbf{K}+\mathbf{K}_p\right]\mathbf{d}=\mathbf{F}+\mathbf{F}_p$$

Assim, podemos dizer que neste problema a matriz de rigidez convencional **K** e o vector das forças nodais **F**, vêm acrescentados de parcelas em relação ao conhecido problema de estática **Ka** = **F**. Portanto, a formulação do elemento finito de interface consiste na determinação da sua contribuição, $\mathbf{K}_p$ e $\mathbf{F}_p$, nas matrizes globais do problema.

Nesta formulação é possível ainda incorporar comportamentos não lineares geométricos e elasto-plásticos e envolve sempre a resolução de um problema não linear por um método iterativo do tipo de Newton-Raphson com a aplicação da carga por incrementos.

Os programas comerciais, como o ABACUS ou o LUSAS, em que o utilizador pode programar alguns tipos de rotinas, permite levar a cabo análises deste tipo. Citamos como trabalhos com aplicações deste tipo, as referências [28, 32-35]

No projecto *"Estudo do Comportamento Mecânico de Componentes Estruturais em Materiais Compósitos – Utilização Conjugada do Método dos Elementos Finitos e Técnicas de Interferometria Holográfica"* a Engª Ana Amaro está a desenvolver um elemento de interface de 16 nós, isoparamétrico para ligar os conhecidos elementos hexaédricos isoparamétricos de 20 nós para utilizar no programa MODULEF.

Por sua vez o Eng.º Luís Ferreira encontra-se a explorar os algoritmos de análise transitória do mesmo programa para desenvolver um algoritmo com elementos de interface e simular a progressão dinâmica de frentes de fendas na delaminação de compósitos.

Este grupo iniciou a investigação nesta área usando a formulação dinâmica transitória, com a tese de mestrado " *Propagação Dinâmica de Fendas de Fractura"* de Rilo, N. F. [39]. Neste trabalho desenvolve-se o programa CRACK que permite o estudo numérico da propagação dinâmica de fendas de fractura usando elementos rectangulares planos isoparamétricos na discretização espacial e o método explicito das diferenças centrais para integração no tempo das equações do movimento.

A aplicação do programa permitiu analisar a propagação dinâmica de fendas em provetes normalizados DCB (Double Cantiver Beam) e em Placas Quadradas usando o parâmetro de fractura G e considerando o comportamento elasto-viscoplastico de Perzina do material.

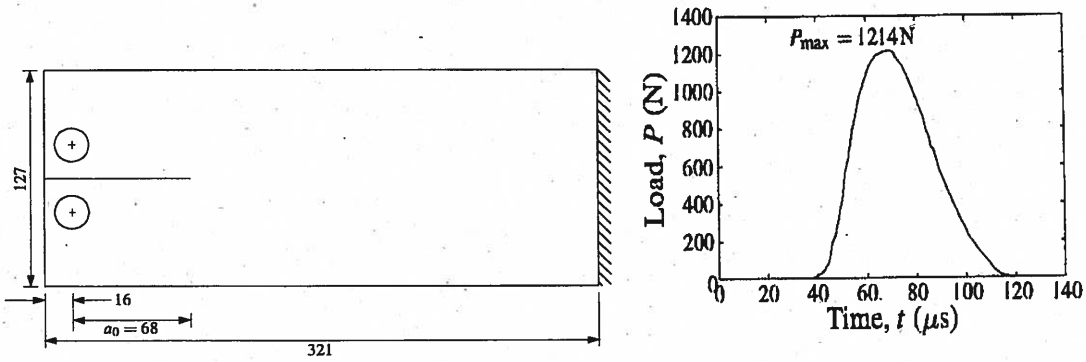


Fig. 7 Provete DCB usado na análise dinâmica de fractura por Rilo, N. F. [39].

4 – CONCLUSÕES: QUESTÕES CRÍTICAS NA INVESTIGAÇÃO DA IDENTIFICAÇÃO E CONTROLO DO DANO EM COMPONENTES DE MATERIAIS COMPÓSITOS

A revisão das publicações sobre a investigação sobre este tema geral de avaliação do dano em componentes de materiais compósitos e a experiência já adquirida pelo grupo e pelos seus membros, permitem identificar as seguintes questões críticas na investigação com o objectivo de criar métodos práticos e com viabilidade para serem usados correntemente:

- a generalidade dos métodos ainda necessita do conhecimento prévio de resultados numéricos ou de dados experimentais dos componentes antes de sofrerem dano. Este facto limita a aplicação prática dos métodos.
- a sensibilidade dos parâmetros usados, como por exemplo as frequências ou os modos de vibração, ainda é objecto de controvérsia entre investigadores. Há trabalhos que afirmam a sensibilidade de um parâmetro ou outro para casos determinados mas não procuram ou conseguem generalizar o seu desempenho o que dificulta a afirmação da fiabilidade dos métodos.
- a generalidade dos métodos refere-se a variações lineares parâmetros usados deixando de fora a modelação de fenómenos em que ocorrem comportamentos não lineares dos materiais ou dos componentes.
- alguns métodos exigem números determinados de sensores para medir ou avaliar os parâmetros usados e a sua localização é feita em lugares adequados para os casos estudados. Na prática corrente pode não se dispor de um numero suficiente de sensores e a sua localização também pode não ser obvia.
- a aplicação de alguns métodos a casos reais de estruturas de grande porte exigem excitações induzidas nas estruturas que limitam a sua aplicabilidade.

- na literatura são escassos os trabalhos que comparem de uma forma objectiva a aplicação de diversos métodos aos mesmos casos práticos, particularmente a casos de sistemas ou componentes reais.

REFERÊNCIAS

[1] Boyer, H. E. and Gall, T. L., (eds), Metals Handbook, Part IV, Section 33, Nondestrutive Testing, Amer. Soc. Metals, Metals Park, OH, 1985.

[2] Rytter, A., Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures, Ph. D. Dissertation, Department of Building Technology and Strutural Engineering, Aalborg University, Denmark, 1993.

[3] Doebling, S. W., Farrar, Ch. R., Prime, M. B. and Shevitz, D. W., Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in their Vibration Characteristics. A Literature Review, Los Alamos National Laboratory, LA-13070-MS, Uc-900, 1996

[4] Lifshitz, J. M. and Rotem, A., Determination of Reinforcement Unbonding of Composites by a Vibration Technique, Journal of Composite Materials, 3, 412-423, 1969.

[5] Jones, T. S., Nondestrutive Evaluation Methods For Composites, Handbook of Composites, Edited by S. T. Peters, Chapman&Hall, London, 1998.

[6] Shultz, A. B. and Warwick D. N., Vibration Response: A Non-Destrutive Test for Fatigue Crack Damage in Filament-Reinforced Composites, Journal of Composite Materials, 5, 394-404, 1971.

[7] Adams, R. D., Walton, D., Flitcroft, J. E. and Short, D., Vibration Testing as a Nondestrutive Test Tool for Composite Materials, Composite Reliability, ASTM STP 580, 159-175, 1975.

[8] Maeda, T. and Koga, T., Determination of Rigidities of Fiber-Reinforced Plastic Laminates Using Holografic Interferometry, AIAA Journal, Vol. 34, Nº 6, 1301-1303, 1996.

[9] Maeda, T., Baburaj, V. and Koga, Tatsuzo, Evaluation of In-plane Shear Moduls of Composite Laminates Using Holgraphic Interferometry, Opt. Eng. 36(7) 1942-1946 (July 1997).

[10] Pederson, P., Optimization Method Applied to Identification of Material Parameters, Discretization Methods and Strutural Optimization – Procedures and Applications (Ed. Eschenauer, H. A. and Thierauf, G.), Springer-Verlag, 1989, pp.277-283.

[11] Afonso, J. M. M., Identificação de Propriedades Mecânicas de Materiais Compósitos Utilizando Técnicas de Optimização, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica pelo IST, Lisboa, 1991.

[12] Santos, J. V. A., Desenvolvimento de Modelos Estruturais para a Identificação de Propriedades Mecânicas de Materiais Compósitos, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica pelo IST, Lisboa, 1996.

[13] Roseiro, L. M. F., Desenvolvimento de Modelos Discretos de Elementos Finitos com Campo de Deslocamentos de Primeira e Terceira Ordem, Tese de Mestrado em Ciências de Engenharia Mecânica, FCTUC, Coimbra, 1997.

[14] Ramos, U. M. O., Desenvolvimento de Modelos Discretos de Elementos Finitos Mistos para Placas Laminadas, Tese de Mestrado em Ciências de Engenharia Mecânica, FCTUC, Coimbra, 1998.

[15] Ferreira, L. M. S., Tese de Mestrado em Ciências de Engenharia Mecânica, FCTUC, Coimbra, 1998.

[16] Neto, M. A., Desenvolvimento de um Modelo Discreto de Elementos Finitos com Efeito de Corte para Placas, Tese de Mestrado em Ciências de Engenharia Mecânica, FCTUC, Coimbra, 1998.

[17] Peixinho, N. R. M., Análise Dinâmica de Placas Compósitas Laminadas por Interferometria Holográfica e Elementos Finitos, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica pela FCTUC (apresentada), Coimbra, 1998.

[18] Martins, T. L. R. C., Caracterização de Ortotropia em placas de Epóxido Carbono Utilizando Técnicas Interferométricas, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica pela FEUP, Porto, 1997.

[19] Kachanov, M., Continuum theory of media with cracks, Mekhanika Tverdogo Tela, 7 54-9, 1972

[20] Allen, D. H., Harris, C. E. and Groves, S. E., A thermomechanical constitutive theory for elastic composites with distributed

damage – theoretical development, Int. J. Solids Struct., 23, (9), 1301-1318, 1987.

[21] Tay, T. E., and Lim, E. H., Analysis of stiffness loss in cross-ply composite laminates, Composite Struct., 25, 419-425, 1993.

[22] Talreja, R., A continuum mechanics characterization of damage in composite materials, Prc. R. Soc. Lond., A 399, 195-216, 1985.

[23] Tay, T. E., and Lim, E. H., Analysis of strsses in cross-ply composite laminates containing distributed transverse cracks, Finite Elements in Analysis and Design, 18, 301-308, 1994.

[24] Tay, T. E., and Lim, E. H., Analysis of composite laminates with transverse cracks, Composite Structures 34, 419-426, 1996.

[25] Tay, T. E., Lim, E. H. and Cen, Z., Analysis of composite structures with distributed and localized damage by the finite-element method, Composite Structures, 37, 135-143, 1997.

[26] Kwon, Y. S. and Sankar, B. V.; Indentation-Flexure and Low-Velocity Impact Damage in Graphite/Epoxy Laminates; NASA Contrator Report 187624, Grant NAG1-826, March 1992.

[27] Sankar, B. V. and Nguyen, P. T., Nondimensional Impact Models for Composite Laminates, Proceedings of the American Society for Composites 5th Technical Conference, E. Lansing, Michigan, June, pp. 600-610, June 1990.

[28] Moura, F. S. F., Modelos de Previsão do Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos de Carbono-Epóxido Sujeitos a Impacto de Baixa Velocidade e da sua Resistência Residual à Compressão Após Impacto, Tese de Doutoramento pela FEUP, Porto, 1995.

[29] Nosier, A., Kapania, R. K. and Reddy, J. N., Forced vibration and low-velocity impact of laminated composite plates, Sãdhnã, Vol. 19, Part 3, 509-541, June 1994.

[30] Beer, G., An Isoparametric Joint/Interface Element for Finite Element Analysis, Int. J. Numerical Methods in Engineering, 21, 583-600, 1985.

[31] Moura, M. F. S. F., Gonçalves, J. P. M., Marques, A. T. and Castro, P. M. S. T., Modeling Compression Failure After Low Velocity Impact on Laminated Composites Using Interface Elements, J. Composite Materials, Vol. 31, Nº 15, 1997.

[32] Moura, M. F. S. F., Gonçalves, J. P. M., Marques, A. T. and Castro, P. M. S. T., Elemento Finito Isoparamétrico de Interface para Problemas Tridimensionais, Revista Inter. Métodos Num. Calculo Diseño Ingenieria, Vol. 12, 4, 447-466, 1996.

[33] Gonçalves, J. P. M., Moura, M. F. S. F., Castro, P. M. S. T.and Marques, A. T., Aplicações dum Elemento Finito de Interface a Problemas Estruturais, Actas das 6ºs Jornadas de Fractura, 1998.

[34] Chen, J., Crisfield, M., Kinloch, A. J., Matthews, F. L, Busso, E. and Qui, Y., The application of interface elements in predicting progressive delamination of composite material specimens, Mechanics of Composite Materials and Structures, NATO Advanced Study Institute, Troia, Portugal, July 12-24, 1998.

[35] Fuehe, J. P. and Engblom, J. J., Finite Element/Penalty Function Method for Computing Stresses near Debonds, AIAA Journal, Vol. 30, Nº 6, June 1992.

[36] Tsai, S. W. and Hahn, H. T., Introduction to Composite Masterials, Technomic Publishing Company, Lancaster, PA, USA, 1982.

[37] Lakshminarayana, H. V., Boukhili, R. and Gauvin, R., Impact response of laminated composite plates: Prediction and verification, Composite Structures, 28, 61-72, 1994.

[38] Lakshminarayana, H. V., Boukhili, R. and Gauvin, R., Finite element simulation of impact tests of laminated composite plates, Composite Structures, 28, 47-59, 1994.

[39] Rilo, N. F., Propagação Dinâmica de Fendas de Fractura, Tese de Mestrado em Engenharia Estrutural pela FEUP, Porto, 1985.

[40] Araújo dos Santos, J. V., Mota Soares, C. M.; Mota Soares, C. A. and Pina , H. L. G. ; "Damage Identification of Composite Structures: A Numerical Model, Mechanics. of Composite Materials and Structures, NATO Advanced Study Institute, Tróia, Portugal, July 12–24, 1998.