

# ANÁLISE DIGITAL DE DANO NA FURAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS LAMINADOS

JUAN C. CAMPOS RUBIO<sup>1\*</sup>, ALEXANDRE M. ABRÃO<sup>1</sup>, PAULO E. FARIA<sup>1</sup>, J. PAULO DAVIM<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte MG, CEP: 31.270-901 Brasil.  
juan@ufmg.br

<sup>2</sup>Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal.

**ABSTRACT:** Fibre reinforced composites are widely recognized for their superior mechanical properties and advantages for applications in aerospace, defense and transportation sectors. In spite of the fact that, in general, composites are produced to near-net-shape, additional machining operations such as drilling are often required. Nevertheless, the cutting tool action during machining may damage the work material surfaces. Delamination is the principal damage observed after drilling composite materials. The delamination factor has been used by several investigators to characterize the level damage the drill entrance and exit side of the machined composite material. More frequently, this factor is determined as the ratio of the maximum diameter in the damage zone to the nominal diameter. The aim of this work is to propose a methodology based on digital analysis of the damage in order to assess delamination.

**Keywords:** Composite laminates, Delamination factor, Digital analysis, Drilling.

**RESUMO:** Compósitos reforçados com fibras apresentam diversas propriedades que permitem sua utilização em aplicações estruturais, particularmente nas indústrias automotiva e aeroespacial, entre outras. Embora sejam fabricados com dimensões e forma próximas das finais, operações como as de furação são frequentemente necessárias com o objetivo de criar pontos de fixação. Estas operações de usinagem provocam danos tanto na entrada como na saída do furo, sendo a delaminação o mais característico destes danos. Diversos autores têm utilizado o fator de delaminação como parâmetro para caracterização do nível de dano induzido na furação de compósitos, no entanto, na maioria dos casos este fator considera a relação entre o diâmetro máximo do dano e o diâmetro nominal do furo. Este trabalho apresenta uma metodologia da análise de imagens digitais para determinação do fator de delaminação e propõe um novo parâmetro que permita uma melhor caracterização do dano ocorrido.

**Palavras chave:** Compósitos laminados, Fator de delaminação, Análise digital, Furação.

## 1. INTRODUÇÃO

Apesar dos materiais plásticos reforçados serem empregados em aplicações de engenharia desde a primeira década do século XX, foi a partir da década de 40 que a sua utilização pela indústria voltada para o setor militar passou a apresentar crescimento acentuado, seguida mais tarde por outros diversos segmentos da indústria de bens de consumo, a partir do momento em que o custo desses materiais deixou de ser proibitivo. Aplicações típicas desses materiais incluem componentes aeronáuticos, automotivos e náuticos, estruturas marítimas, tubulações, componentes eletrônicos e ainda equipamentos militares e esportivos, particularmente em situações onde elevada relação entre resistência mecânica (ou rigidez) e massa é desejada.

Diante deste crescente campo de aplicações fica evidente, portanto, a necessidade de se gerar conhecimento acerca do

comportamento dessa categoria de materiais durante operações de usinagem de modo a se obter um desempenho satisfatório durante o corte, além de produzir componentes que atendam aos requisitos estabelecidos. O fato de o material ser composto por constituintes tão distintos entre si (matriz e fibras) por vezes torna sua usinagem bastante complexa, dificultando a obtenção de superfícies de boa qualidade e de tolerâncias dimensionais e geométricas estreitas.

A operação de furação tem recebido a atenção de diversos pesquisadores, principalmente devido aos danos causados na entrada e saída da ferramenta na peça, caracterizados principalmente pela presença de trincas, delaminação da peça ou ainda descolamento das fibras da matriz. De modo a superar estes problemas, Dharan e Won [1] propuseram um sistema capaz de monitorar a força de avanço e torque, e assim atuar no comando numérico da máquina ferramenta de modo a modificar as condições de operação (principalmente

por meio da redução do avanço) e assim evitar danos ao componente usinado. Caprino e Tagliaferri [2] investigaram a furação de compósito de poliéster reforçado com fibras de vidro com brocas de aço rápido. Os autores concluíram que o avanço é o principal parâmetro responsável pela intensidade e natureza dos danos causados à peça.

Diante do referido fica evidente a necessidade de se agregar novos conhecimentos àqueles existentes a respeito da usinabilidade de compósitos plásticos reforçados com fibras, principalmente devido à crescente utilização desses materiais por diversos segmentos da indústria. Existe um consenso entre a maioria dos autores a respeito da escassez de informações a respeito do comportamento desses materiais quando submetidos à operações e condições de corte distintas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Materiais Compósitos

Em meados da década de 70, o estudo de aditivos poliméricos emergiu como um dos campos mais importantes na ciência de polímeros. O uso de partículas na indústria de plásticos iniciou-se quando se constatou que o custo de plásticos podia ser reduzido pela incorporação de materiais inertes. Mais recentemente, partículas foram empregadas para melhoramento de certas propriedades mecânicas, ficando conhecidas como partículas *reforçadoras*. Na prática, o termo reforçador não está especificamente definido, podendo significar um aumento da resistência à tração, à flexão, temperatura de deflexão ao calor, entre outras, de alguma forma contribuindo para melhorar as características físicas do material [3].

Neste sentido, os compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras ou partículas são hoje em dia amplamente utilizados e surgem rapidamente como possíveis substitutos para materiais metálicos convencionais em partes estruturais e em diversas aplicações industriais. Nestes compósitos, o reforçador normalmente fornece a resistência à tração e rigidez, sendo a matriz responsável pela boa adesão da interface matriz e reforçadores [4].

Os engenheiros da indústria aeronáutica estão constantemente procurando materiais estruturais que possuam, entre outras características, baixa relação peso/rigidez e apresentem resistência à abrasão e ao impacto, e que ao mesmo tempo não sejam facilmente corroídos. Esta é uma combinação de características consideravelmente formidável. Com frequência, os materiais mais resistentes são relativamente densos; ainda, o aumento da resistência ou da rigidez resulta, em geral, em uma diminuição da resistência ao impacto. Desta forma, o uso de reforços em materiais poliméricos tem aberto diversas possibilidades de aplicação para este tipo de material compósito [5].

De uma maneira geral, pode-se considerar um compósito como sendo qualquer material polifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades. Além disso, as fases constituintes devem ser quimicamente diferentes e devem estar separadas por uma interface distinta [6].

Os compósitos avançados, como as combinações de fibra de vidro-resina epoxídica e de grafite-resina epoxídica, estão se tornando cada vez mais importantes para aplicações estruturais de grande exigência técnica. Durante os próximos anos, prevê-se um aumento anual médio de cerca de 7,5% no consumo destes materiais. Os aviões comerciais modernos usam cada vez mais materiais compósitos. Por exemplo, o Boeing 777, lançado em 1995, utiliza cerca de 10 por cento em peso de materiais compósitos [7].

Na indústria aeronáutica, bem como em vários outros segmentos industriais onde se utilizam operações de usinagem, a furação é uma das operações freqüentemente usadas para fazer reparos estruturais, e faz parte também do processo de fixação em materiais compósitos. Porém, as brocas usadas nas operações de furação de metais não são bem adaptadas aos materiais compósitos. Elas causam danos que são freqüentemente encontrados durante reparos em peças de compósitos nas estruturas de aeronaves.

Pode-se dividir os defeitos causados pela operação de furação em: danos à entrada do furo, defeitos de circularidade e danos causados pela temperatura na parede do furo, e delaminação na saída do furo. Dentre os defeitos, a delaminação parece ser o mais crítico, podendo comprometer o desempenho material reduzindo sua vida útil quando sujeito à fadiga.

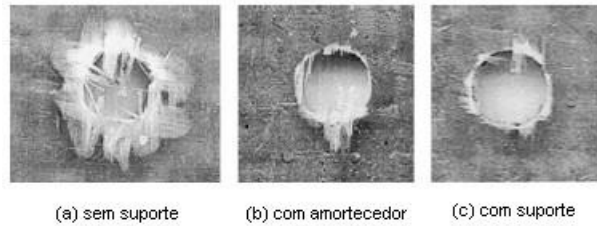
### 2.2. Delaminação

Segundo Khashaba et al. [8], a furação é geralmente um processo final e qualquer defeito durante esta etapa conduz à rejeição do componente usinado. Na indústria aeronáutica, a delaminação durante a furação é responsável por 60% de rejeição de peças. O impacto econômico é significativo devido ao custo de processos anteriores. A delaminação prejudica a vida útil do material, suas propriedades mecânicas, ou seja, seu desempenho fica comprometido, sendo considerado o defeito mais significativo. Mas outros defeitos são também muito prejudiciais, tais como *pull-out* (mudança de alinhamento da fibra), danos térmicos e cratera na matriz.

De acordo com Lachaud et al. [9], podem-se dividir os defeitos causados pela operação de furação em: danos à entrada do furo, defeitos de circularidade, danos causados pela temperatura na parede do furo e delaminação na saída do furo. Os defeitos na entrada do furo não aparecem em todas as ocasiões. São relatados em materiais com certas características de fibras, devido à orientação unidirecional das malhas e também à geometria da broca. Este defeito tende rasgar a primeira malha na primeira linha em contato com a broca. Os defeitos de circularidade estão ligados ao ângulo formado pela direção das fibras da malha e pela direção da borda de corte. A delaminação na saída do furo é provocada pelo fato de que nem todo corpo da broca corta o material. A pressão da broca pode causar tensão normal que provavelmente abre a interface da malha. A delaminação entre malhas propaga-se além do diâmetro do furo e o avanço da broca pode variar a dimensão do furo.

O estudo realizado por Capello [10] analisou o mecanismo de delaminação em placas de material compósito laminado durante a operação de furação com e sem suporte de apoio

para a peça. A figura 1 apresenta algumas diferenças no nível de delaminação obtido no experimento.



**Fig. 1.** Furo (a) com delaminação e sem suporte, furo (b) sem delaminação e com amortecedor e furo (c) sem delaminação e com suporte [10].

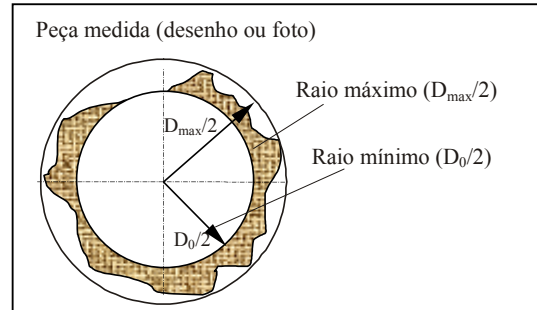
No seu experimento de furação de placas de material compósito Davim e Reis [11] utilizaram um microscópio para a medição da delaminação. Neste trabalho os autores procuraram estabelecer uma relação entre a velocidade de corte e o avanço sobre a delaminação. O planejamento experimental e resultados empregaram o método de Taguchi e a análise de variância (ANOVA), respectivamente.

Para medir a delaminação Tsao e Hocheng [12] utilizaram uma montagem, conforme o esquema mostrado na figura 2, na qual um equipamento de varredura ultra-sônica gera as imagens do furo. De posse dessas imagens foi possível medir o diâmetro máximo ( $D_{max}$ ) e o diâmetro nominal ( $D_0$ ) e assim calcular o fator de delaminação ( $F_d$ ), através da expressão  $F_d = D_{max}/D_0$ . A figura 3 apresenta a forma de medição destes diâmetros.

**2.3 Digitalização de Imagem**

Atualmente diversas áreas têm utilizado procedimentos de reconhecimento de padrões e análise de imagens. Áreas como processamento de informações escritas e documentação têm utilizado análise de imagens para reconhecimento de caracteres e documentos. Na área médica, tem-se a identificação e diagnóstico automático de tumores, contagem de células do sangue, sistemas de visualização, etc. Na indústria, a inspeção automática é uma das principais aplicações. Na área de segurança tem-se a identificação de pessoas por meio de impressões digitais, reconhecimento de face, da íris e do formato da mão. Em

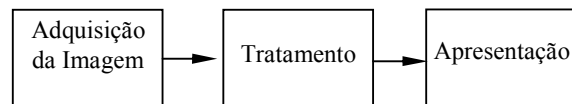
aplicações militares, a identificação de alvos táticos, interpretação de imagens de satélites, etc. Em robótica diversos sistemas de visão e reconhecimento de padrões têm sido desenvolvidos, seja para aplicações de exploração em lugares perigosos para seres humanos, como em outros planetas ou em usinas nucleares, seja para auxílio a deficientes físicos, sistemas de visão de auxílio à dirigibilidade de automóveis, aviões, entre outros. Outras áreas de aplicação incluem realidade virtual, entretenimento, astronomia, etc. [13].



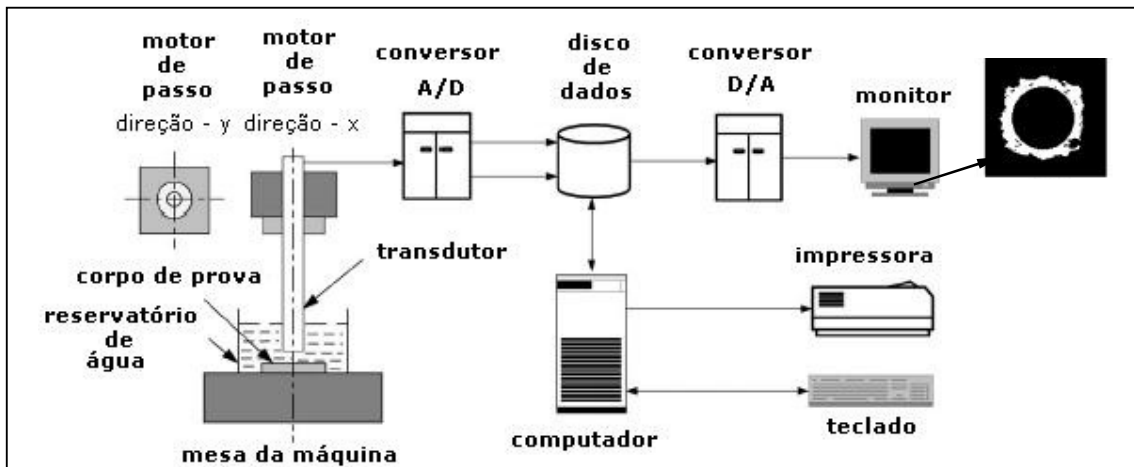
**Fig. 3.** Medição dos diâmetros para obtenção do fator de delaminação ( $F_d$ ).

O termo imagem digital refere-se a uma imagem que pode ser discretizada quanto às suas coordenadas espaciais e quanto à intensidade de seu brilho. Logo, uma imagem digital pode ser considerada uma matriz cujos índices das linhas e colunas identificam um ponto dentro da imagem e o correlacionam com o valor do elemento da matriz que identifica o nível de intensidade luminosa naquele ponto [14]. Todo sistema de processamento de imagem digital pode ser representado por um diagrama de blocos contendo, normalmente, três elementos principais, como mostrado na figura 4: a aquisição da imagem, sua conversão e posterior exibição.

**Error!**



**Fig.4.** Diagrama de blocos para aquisição de imagens digitais.



**Fig. 2.** Desenho esquemático do sistema empregado para gerar a imagem e medir a delaminação [12]

A aquisição de imagens é a conversão da cena numa representação digital que poderá ser processada por um computador e ser efetuada por um sistema de sensores especialmente projetado para captar uma cena e prover sua

representação digital. Essa aquisição pode envolver a conversão de outro meio, tais como, televisão e filmes gravados em fitas.

A exibição da imagem é a geração de um produto de saída que possa ser visto por um observador humano por meio temporário (monitor de vídeo, por exemplo) ou permanente (filme), todos numa forma analógica convertida a partir de dados digitais. O processamento de imagem fornece a digitalização da imagem para produzir um resultado desejado, desde sua intensificação para a exibição melhorada do detalhe de uma cena até o processamento de várias imagens constituintes. No processo de discretização, a imagem é quadriculada por um malha regular. Cada "pixel" (célula) desta malha é descrito por um par de coordenadas (x, y) relativas a um referencial posicionado no canto superior esquerdo da imagem [14].

No contexto relacionado à automação de processos industriais, podem-se dividir algumas áreas relevantes da visão computacional em dois grandes grupos claramente relacionados: processamento de imagens e reconhecimento de padrões. O primeiro lida principalmente com operações nas imagens e ajuda a melhorar sua qualidade, ou seja, enfatizar aspectos de importância particular, tendo como objetivo principal criar um modelo real fazendo uso de imagens, obtendo informações da cena a partir de sua projeção bidimensional; o segundo está relacionado com a identificação ou interpretação das imagens. Ele ajuda a extrair informação (em alto nível) daquilo que a imagem tenta comunicar.

### 3. METODOLOGIA USADA PARA OBTENÇÃO DA ÁREA DELAMINADA

Diversas técnicas podem ser usadas para a análise e cálculo da área delaminada em furos produzidos em materiais compósitos. Por exemplo, Gao e Kim [15] apresentam um estudo comparativo de técnicas destrutivas e não-destrutivas para caracterização de danos em compósitos reforçados com fibras. Os autores concluem que a inspeção visual apresenta diversas desvantagens associadas a dificuldade de medição do perfil do dano e sua profundidade.

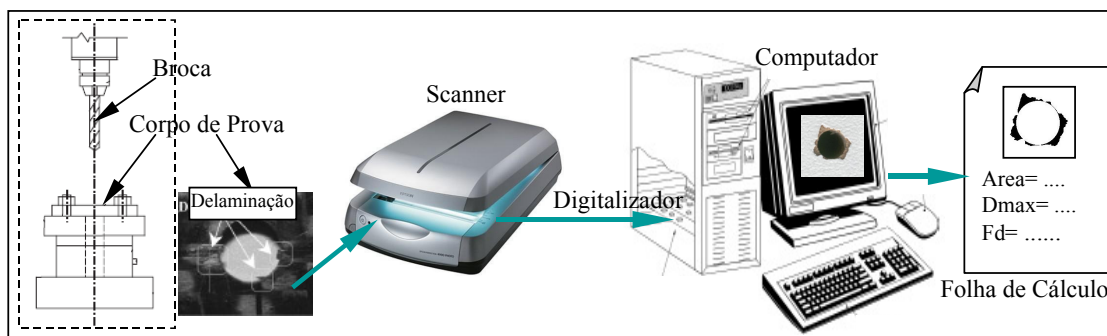
No presente trabalho, a análise digital de imagens é usada com o intuito de caracterizar a extensão da área delaminada na furação de materiais compósitos laminados, tanto na entrada como na saída da broca. A metodologia a ser adotada para o desenvolvimento de um sistema que permita a avaliação do fator de delaminação será baseada na aquisição e digitalização de imagens de furos usinados em placas de material compósitos. Posteriormente estas imagens serão tratadas de forma a permitir caracterizar o nível de dano (delaminação) com auxílio de programas computacionais. A figura 5 apresenta a arquitetura básica inicial para a montagem experimental idealizada.

Como forma de se obter uma imagem de qualidade aceitável, uma série de parâmetros deve ser selecionada apropriadamente, tais como brilho, intensidade, filtragem de ruído (*despeckle*), detecção de bordas, entre outros. Finalmente, a imagem binária deve ser submetida a um filtro de banda (*threshold filter*) com o objetivo de transformar as escalas de cinza em pontos totalmente pretos ou brancos, para desta forma facilitar o cálculo da área efetivamente delaminada.

### 4. TESTES REALIZADOS E RESULTADOS OBTIDOS

Os testes de furação aqui apresentados foram realizados num centro de usinagem com potência no eixo árvore de 7.5 kW e velocidade de rotação máxima de 8000 rpm. O material utilizado foi um compósito laminado de resina epóxi reforçado com fibras de vidro (concentração de 50:50) de gramatura 200 g/m<sup>2</sup> e orientação das fibras 0/90°. As lâminas de compósitos foram obtidas manualmente pela sobreposição de 10 camadas de fibras, obtendo-se laminas com 3 mm de espessura média. A ferramenta utilizada foi uma broca helicoidal de aço rápido Titex Plus A1141 com diâmetro de 5 mm, ângulo de ponta de 118° e 2 arestas de corte. A Tabela 1 mostra os parâmetros de corte empregados no ensaio, assim como os resultados de delaminação obtidos para 3 velocidades de corte e 4 avanços distintos.

O dano na entrada do furo foi digitalizado por meio de um *scanner* de 600 dpi de resolução. O tratamento e análise das imagens foi realizado com auxílio do software ImageJ 1.34s do National Institute of Health (EUA). A Figura 6 apresenta as imagens digitalizadas da delaminação na superfície de entrada dos furos: (a) imagem original (sem tratamento) e (b) área delaminada obtida por tratamento de imagens.



**Fig. 5.** Sistema proposto para análise digital da delaminação em materiais compósitos laminados

Tabela 2 - Parâmetros de corte e os correspondentes fatores de delaminação e área delaminada medidos digitalmente.

Teste N°	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	Medição digital do dano <sup>(1)</sup>	
			Fator de delaminação ( $F_d = D_{max}/D_0$ )	Área delaminada (mm <sup>2</sup> )
1	55	0,04	1,150	0,70
2	55	0,10	1,172	0,48
3	55	0,15	1,194	1,38
4	55	0,20	1,172	1,15
5	71	0,04	1,236	2,05
6	71	0,10	1,370	3,43
7	71	0,15	1,510	6,48
8	71	0,20	1,306	4,75
9	86	0,04	1,166	0,76
10	86	0,10	1,130	0,46
11	86	0,15	1,122	0,59
12	86	0,20	1,334	2,78

<sup>(1)</sup> Incerteza de medição de  $\pm 0,026$  mm

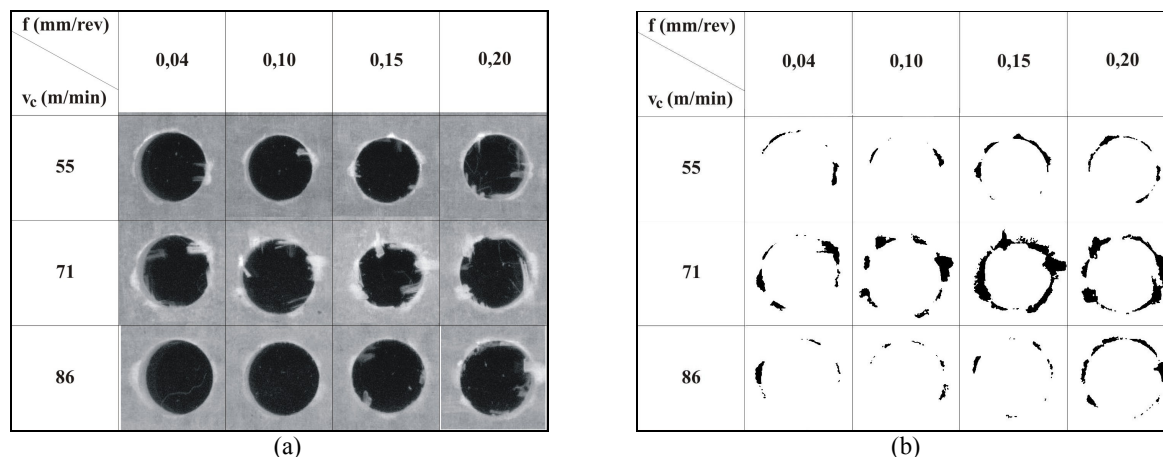


Fig. 5. Delaminação na superfície de entrada na furação de compósitos laminados de resina epóxi reforçada com fibras de vidro: (a) imagens original; (b) áreas delaminadas obtidas por tratamento de imagens.

Através dos resultados pode-se observar que existe um aumento do dano (delaminação) na medida em que os parâmetros de corte são aumentados, sendo isto mais claro com o aumento do avanço. Por outro lado, nota-se que em testes nos quais o fator de delaminação é similar ao de outro teste (em virtude de possuírem o mesmo comprimento máximo de dano -  $D_{max}$ ), a imagem revela que a maior área delaminada deverá provocar uma vida útil mais curta para a união, em função da maior avaria apresentada por este. Desta forma, pode-se assegurar que a utilização do fator de delaminação ou da área delaminada (quando avaliados isoladamente) não representa de forma adequada a extensão do dano induzido no material pelo processo de usinagem.

Desta forma, torna-se mais adequado o uso de um fator de dano que leve em consideração não só o tamanho da delaminação ( $D_{max}$ ) como também a área delaminada, como apresentado em Davim et al. [16]. Este tipo de fator de delaminação híbrido permitira uma melhor caracterização do nível de dano na furação de compositos, juntamente com permitir uma melhor visualização da tendência de aumento ou diminuição do dano em função dos parâmetros de corte.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir deste trabalho será possível desenvolver um sistema para ser usado na avaliação dos desvios geométricos e da delaminação na usinagem de materiais compósitos. O método baseia-se na aquisição, tratamento e análise de imagens digitais.

Pode-se observar que a utilização do fator de delaminação, como concebido na bibliografia, apresenta desvantagens,

uma vez que não avalia o dano provocado pelo processo de usinagem em função também de sua área, e sim apenas do comprimento da trinca.

Finalmente, pode-se afirmar que a criação de um parâmetro híbrido que contemple as duas características geométricas do dano, quais sejam o comprimento da trinca e a área da superfície delaminada, apresente melhores resultados na caracterização do grau de delaminação ocorrido.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer às entidades de apoio a pesquisa de Portugal (GRICES) e do Brasil (CAPES) pelo suporte financeiro a este trabalho.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Dharan C.K.H.; Won M.S. "Machining Parameters for an Intelligent Machining System for Composite Laminates". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2000: 40; 415-426.
- [2] Caprino G.; Tagliaferri V. "Damage Development in Drilling Glass Fiber Reinforced Plastics". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1995: 35 (6); 817-829.
- [3] Bloom P.D.; Baikerikar K.G.; Otaigbe J.U.; Sheares V.V. "Development of novel polymer/quasicrystal composite materials". *Materials Science and Engineering*. 2000. 156-159.
- [4] Almeida, J.R.M.; Monteiro, S.N. "The resin/hardener ratio as a processing parameter for modifying the mechanical behavior of epóxi-matrix/Glass microsphere composites". *Composites Science and Technology*. 1998: 58; 1593-1598.
- [5] Herakovich, C.T. "Mechanics of Fibrous Composites". University of Virginia. 1998.
- [6] Callister W.D. "Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução". 5ª ed. LTC, Rio de Janeiro. 2002.
- [7] Smith, F.W. "Princípios de Ciências e Engenharia dos Materiais". 3ª ed., Mc Graw-Hill, Alfragide. 1996.
- [8] Khashaba, U.A. "Delamination in Drilling GFR-Thermoset Composites". *Composite Structures*: 2004: 63; 313-327.
- [9] Lachaud, F.; Piquet, R.; Collombet, F.; Surcin, L. "Drilling of Composite Structures". *Composite Structures*. 2001: 52; 511-516.
- [10] Capello, E. "Workpiece Damping and its Effects on Delamination Damage in Drilling thin Composite Laminates". *Journal of Materials Processing Technology*. 2004: 148; 186-195.
- [11] Davim, J.P.; Reis, P. – Study of Delamination in Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) Using Design Experiments, *Composite Structures*. 2003: 59; 481-487.
- [12] Tsao, C.C.; Hocheng, H. "Taguchi Analysis of Delamination Associated with Various Drill Bits in Drilling of Composite Material". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2004: 44; 1085-1090.
- [13] Rocha, R.N. "Aplicações de técnicas de processamento de imagens e visão computacional em inspeção visual". São Carlos, 259 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2000.
- [14] Carvalho, A.; Silva, R.; Rebello, J.; Viana, A. "O mundo das imagens digitais". *Revista Matéria*. 2003: 8 (2); 167-186.
- [15] Gao, S.-L.; Kim, J.-K. "Scanning acoustic microscopy as a tool for quantitative characterization of damage in CFRPs". *Composite Science and Technology*. 1999: 59; 345-354.
- [16] Davim, J.P.; Campos Rubio, J.C.; Abrão, A. "A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates". *Composite Science Technology*. 2007 – in press.