

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/333357414>

# MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X APLICADA À AVALIAÇÃO DE FATORES DE DELAMINAÇÃO EM LAMINADO COMPÓSITO USINADO A SECO E COM RESFRIAMENTO CRIOGÊNICO

Conference Paper · November 2018

CITATIONS  
0

READS  
35

4 authors:



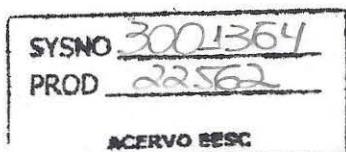
Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Composição Empresarial ( Micro, pequena e Media Empresas) e Base Economica Municipal ( Agricola, Industria , Serviços, Comércio) Subsídios e estudos para o Parque Tecnologico e para a Política Industrial Sorocabana e Metropolitana [View project](#)



Moulds manufactured by Micromilling and Electro-Discharge Machining [View project](#)





## MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X APLICADA À AVALIAÇÃO DE FATORES DE DELAMINAÇÃO EM LAMINADO COMPÓSITO USINADO A SECO E COM RESFRIAMENTO CRIOGÊNICO

F. A. Toti<sup>1</sup>, M. F. Batista<sup>2</sup>, A. R. Rodrigues<sup>3</sup>, A. C. S. Pozzi<sup>3</sup>, J. R. Tarpani<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculdade de Tecnologia de Sorocaba, Sorocaba, SP, Brasil

<sup>2</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Araraquara, SP, Brasil

<sup>3</sup> Universidade de São Paulo, USP-São Carlos, SP, Brasil

Av. Eng. Carlos Reinaldo Mendes, 2015, Sorocaba-SP, 18013280  
[ftoti@fatecsorocaba.edu.br](mailto:ftoti@fatecsorocaba.edu.br)

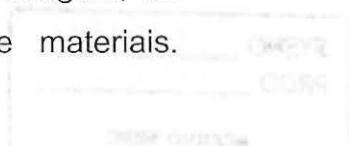
### RESUMO

A utilização de laminados compósitos de matriz termoplástica reforçada com fibras de carbono nos setores industriais mais avançados é crescente em função das excelentes propriedades mecânicas, bem como de possibilitar reparo por reconsolidação. Nesse contexto, quando submetidos a operação de furação são propensos a apresentar defeitos e na literatura muitos estudos visam a sua redução, dentre elas a recente utilização de nitrogênio líquido como meio refrigerante durante a usinagem. O objetivo deste trabalho foi de avaliar e de correlacionar, através da análise de imagens obtidas por microtomografia computadorizada de raios-X, o fator de delaminação convencional ( $F_d$ ) com o fator de delaminação ajustado ( $F_{da}$ ), ambos obtidos na saída do furo usinado a seco e via resfriamento criogênico, respectivamente. Os resultados tanto para  $F_d$  como para  $F_{da}$  indicaram que a usinagem mais adequada se dá na condição a seco, que também apresentou menor espessura do dano ( $h_d$ ) ao redor do furo, sendo  $h_d$  proposto como um potencial parâmetro da gravidade do dano impingindo ao laminado compósito.

Palavras-chave: Delaminação, Furação, Laminado Compósito, Microtomografia Computadorizada

### INTRODUÇÃO

Nos setores industriais aeronáutico e astronáutico é crescente a utilização de laminados compósitos estruturais de matriz termoplástica reforçada com fibras contínuas de carbono (CFRP) em função das excelentes propriedades mecânicas por unidade de massa, bem como do potencial de soldagem, de reparo por reconsolidação e de reciclagem desta classe de materiais.





Componentes e estruturas projetados e fabricados com estes laminados são em quase sua totalidade submetidos a processos de usinagem, notadamente furação, de sorte que este aspecto é de fundamental importância para a garantia de integridade e segurança dos mesmos em condições de operação em serviço. Entretanto, nos Compósitos poliméricos Reforçados com Fibras de Carbono (CFRCs), devido a estrutura não homogênea e fortemente anisotrópica, sua furação torna-se difícil <sup>(1)</sup>. Aliado a isso, quando submetidos a esse processo secundário estes materiais apresentam defeitos tais como: fibras arrancadas, fissuras na matriz e delaminação na entrada e saída do furo <sup>(2)</sup>. Quanto à orientação das fibras, este é um fator essencial e que determina a integridade da superfície usinada, sendo que a orientação de 90° é considerada um ângulo crítico, podendo influenciar na ocorrência de dano subsuperficial <sup>(3)</sup>. Nesse contexto, o processo de furação é importante tópico de pesquisa dos setores acadêmico e industrial, focado na minimização dos defeitos decorrentes do processo de fabricação e que podem provocar danos severos em serviço. Compreender e detectar o tipo, tamanho e a localização do defeito gerado pelo processo de furação é de suma importância para o controle de produção e o auxílio no estabelecimento de fatores de segurança, para a vida do componente perfurado. Neste sentido, um método interessante e não destrutivo é a microtomografia computadorizada por raios X, usada para caracterizar defeitos devido ao processo de furação em compósito CFRC <sup>(4)</sup>.

Nas últimas décadas houve um aumento considerável no estudo da furação, pois é uma área promissora do ponto de vista de aplicação prática e que envolve muitas variáveis de processo, sendo considerado essencial pelas indústrias que utilizam materiais compósitos, nas uniões desmontáveis e não desmontáveis de componentes. A furação a seco é amplamente utilizada, pois dispensa fluidos de corte e não necessita pós-limpeza, entretanto a geração de calor pode levar à na ocorrência, por exemplo, do defeito de delaminação além do desgaste da ferramenta. A fim de minimizar esses problemas, a furação com resfriamento criogênico vem ganhando cada vez mais atenção, visto que oferece melhores condições na redução da temperatura da ferramenta de corte do que o resfriamento convencional <sup>(5)</sup>. Na maioria dos casos, a furação criogênica

aparenta oferecer melhor qualidade de furo, com baixa rugosidade superficial, diâmetro mais preciso, menor geração de rebarba, melhor qualidade da subsuperfície, etc. <sup>(6)</sup>. No entanto, há poucas publicações quanto à aplicação de fluidos de corte e de resfriamento criogênico para reduzir a ocorrência de defeitos no processo de furação dos CFRCs <sup>(7)</sup>.

O objetivo deste trabalho é avaliar e correlacionar os fatores de delaminação propostos na literatura, obtidos na saída do furo usinado a seco e sob resfriamento criogênico, além disso, o parâmetro denominado abertura do dano ( $h_d$ ), obtido por intermédio de imageamento por microtomografia computadorizada de raios-X, é aqui proposto para o estabelecimento do nível de gravidade do dano gerado pela furação.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Material

O material estudado foi o laminado Poli-Sulfeto de Fenileno-Carbono (PPS-C) composto por resina termoplástica PPS, reforçada com fibras contínuas de Carbono T300 JB, gramatura 280 g/m<sup>2</sup>, 17,8 feixes/polegada x 17,8 feixes/polegada, 3.000 filamentos por feixe fornecido pela Tencate. Ele possui uma fração volumétrica de fibras de 50%, sendo confeccionado pela justaposição de 16 lâminas de tecido bidirecional 0/90° com trama 5HS semi-impregnado com o polímero PPS, repetindo-se por 4 vezes o arranjo básico [(0/90),(+45/-45)<sub>2</sub>,(0/90)]. A consolidação do laminado ocorreu por compressão a quente em temperatura próxima de 300°C, para uma espessura nominal do laminado de 5 mm. Os corpos de prova foram extraídos do laminado base de acordo com a orientação da trama (0°) e urdume (90°), com dimensões de 14mmx14mm e espessura integral.

## MÉTODOS

### Processo de Furação das Amostras

No processo de furação foi utilizado um centro de usinagem de três eixos Romi D800 com máximo de 10.000 rpm e potência de 20 cv. A furação foi

realizada sob condições a seco e sob resfriamento criogênico em que a velocidade de corte ( $V_c$ ) foi fixada em 60 m/mim, com quatro diferentes avanços ( $f$ ) por rotação: 45, 90, 180 e 360  $\mu\text{m}/\text{rot}$ . A broca utilizada de metal duro de 6 mm de diâmetro, com dois ângulos de ponta de 130° e 60°, de revestimento de diamante de código A1163-6 foi fornecida pela Indústria Seco Tools. O sistema de resfriamento utilizado para aplicar o nitrogênio líquido ( $\text{LN}_2$ ) foi o modelo SC-18 fornecido pela Indústria Semper Crio.

#### Microtomografia Computadorizada de raios-X

As imagens de 16 corpos de prova foram obtidas em microtomógrafo SKYSCAN 1272 BRUKER, condicionado a uma tensão em 80 kV, com corrente elétrica de 125  $\mu\text{A}$  e imagem de 16 bits, do laboratório do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais – CNPEN. Em seguida, as imagens foram tratadas e analisadas tridimensionalmente (3D) utilizando os softwares CTvox® e o DataViewer® da empresa BRUKER, conforme mostrado na Figura 1.

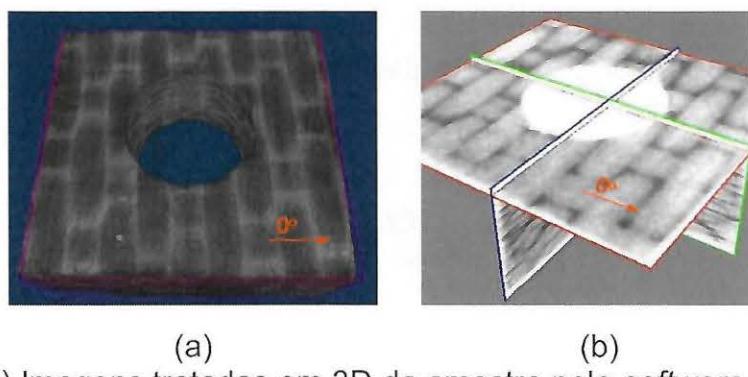


Figura 1 – (a) Imagens tratadas em 3D da amostra pelo software CTvox®. (b) Imagens seccionadas em 3D pelo software DataViewer.

Posteriormente, as imagens foram analisadas bidimensionalmente (2D) em projeção ortogonal para determinar a espesura de dano ( $h_d$ ) para verificar fibras fraturadas e/ou arrancadas, descolamento fibra/matriz, trincamento e arrancamento da matriz. Com a movimentação dos cursores x, y e z foi possível localizar a região, avaliar e medir a espessura de dano ( $h_d$ ) no software CTAn®, conforme mostrado na Figura 2.



Figura 2 – (a) Posicionamento dos cursores sobre a área danificada. (b) Espessura de dano ( $h_d$ ) avaliada no software CTAn®.

#### Avaliação dos Fatores de Delaminação Convencional ( $F_d$ ) e Ajustado ( $F_{da}$ )

O fator de delaminação convencional ( $F_d$ ) foi determinado em função da razão entre o diâmetro máximo ( $D_{max}$ ) da zona danificada e o diâmetro nominal do furo ( $D_{nom}$ ), conforme indicado na equação abaixo <sup>(8)</sup>:

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}} \quad (A)$$

Para determinar o fator de delaminação ajustado ( $F_{da}$ ), foi utilizada a equação abaixo <sup>(9)</sup>:

$$F_{da} = F_d + \frac{A_d}{A_{max} - A_o} \left( F_d^2 - F_d \right) \quad (B)$$

Onde:

$A_d$  = área danificada na delaminação

$A_{max}$  = área em função do  $D_{max}$  da zona danificada

$A_o$  = área em função do diâmetro do furo

Os valores de  $D_{max}$  foram obtidos através das imagens selecionadas no software DataViewer que posteriormente foram transferidas para o software INVENTOR versão® 2017 – AUTODESK. Para obter os valores de  $F_{da}$ , é necessário também a  $A_d$ , que foi calculada através das imagens com extensão bpm, transferidas do software DataViewer para o software ImageJ, de domínio

público, desenvolvido no *National Institutes of Health*. A Figura 3 mostra o sistema de traçagem para determinar o  $D_{max}$  e  $A_d$ .

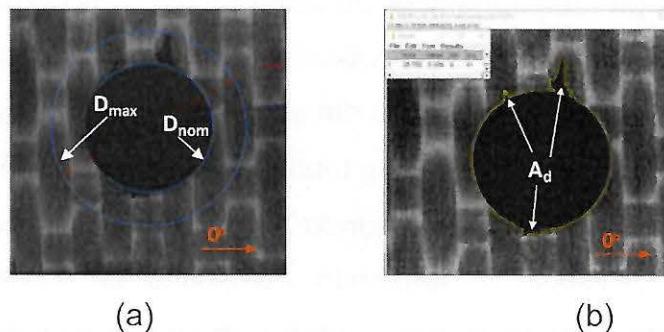


Figura 3 – (a) Sistema de traçagem de arco 3 pontos para determinação do  $D_{max}$ . (b)  $A_d$  selecionada ao redor do diâmetro nominal.

## RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### Análise da Área Danificada de Delaminação ( $A_d$ )

A Figura 4 mostra na condição de furação a seco, imagens tratadas da área superficial de saída do furo dos corpos de prova para cada condição de avanço ( $f$ ). Observa-se que no avanço de 360  $\mu\text{m}/\text{rot}$  apresenta a maior área danificada ( $A_d$ ), onde a direção do dano acompanha preferencialmente à direção do ângulo crítico de 90°<sup>(3)</sup>. Nos avanços de 45 e 180  $\mu\text{m}/\text{rot}$  verificam-se áreas danificadas, mas em menor escala quando comparada com o de 360  $\mu\text{m}/\text{rot}$ , entretanto, no avanço de 90  $\mu\text{m}/\text{rot}$  a área danificada quase que inexistente, porém apresentando rebarbas na saída do furo.

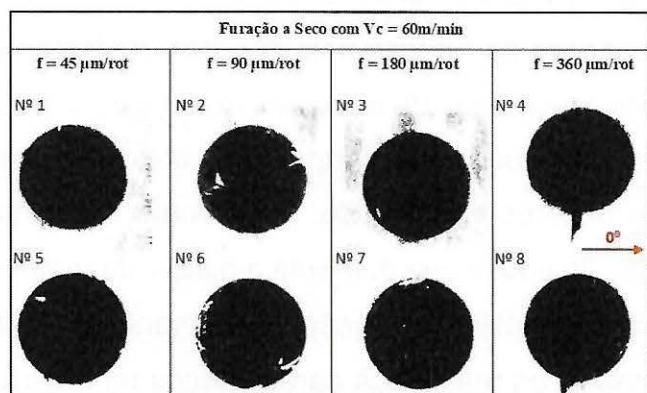


Figura 4 – Imagens da área superficial de saída do furo de cada corpo de prova na condição de furação a seco, com velocidade de corte ( $V_c$ ) de 60m/min.

A Figura 5 mostra na condição de furação com resfriamento criogênico, imagens tratadas da área superficial de saída do furo dos corpos de prova para cada condição de avanço ( $f$ ). Observa-se em todas as imagens a presença de área danificada ( $A_d$ ), sendo de maior dimensão em comparação a condição de furação a seco (Figura 4), mantendo a tendência de direção preferencialmente à direção do ângulo crítico de  $90^\circ$ . Segundo Xia <sup>(6)</sup> concluiu que com a redução da temperatura no processo, o laminado compósito se torna mais rígido e consequentemente mais frágil, pois a matriz absorve pouca energia durante o processo <sup>(6)</sup>.

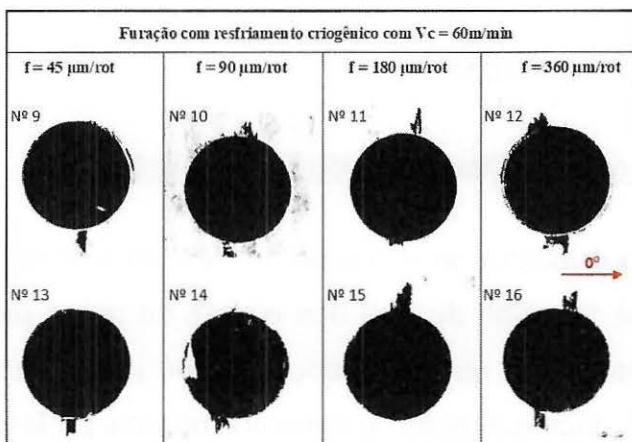


Figura 5 – Imagens da área superficial de saída do furo de cada corpo de prova na condição de furação com resfriamento criogênico, com velocidade de corte( $V_c$ ) de 60m/min.

A Figura 6 apresenta os resultados da força máxima de avanço ( $F_f$ ) versus avanço ( $f$ ) nas condições de furação a seco e com resfriamento criogênico. Os resultados mostram a tendência de aumento da força de avanço com o aumento do avanço para as duas condições, sendo que a condição criogênica apresenta valores em média maiores que a seco. O aumento é devido ao resfriamento efetivo do nitrogênio líquido, o que aumenta a rigidez da matriz polimérica, o que consequentemente aumenta a oposição ao aumento da ferramenta <sup>(6)</sup>. Isto corrobora para explicar os resultados apresentados na Figura 5, pois os danos estruturais aumentam ligeiramente como aumento da força de avanço <sup>(10)</sup>.

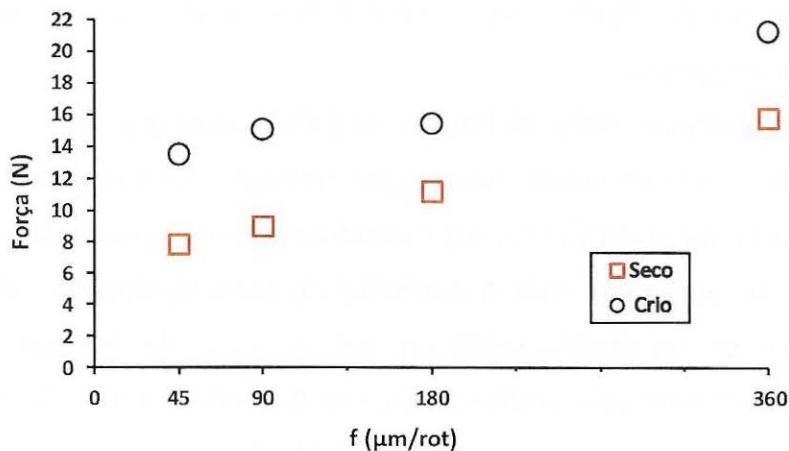


Figura 6 – Valores de força de avanço versus avanço nas condições a seco e com resfriamento criogênico, com velocidade de corte( $V_c$ ) de 60m/min.

#### Análise Comparativa dos Valores de $F_d$ e $F_{da}$

A Figura 7 exibe os valores dos fatores de delaminação convencional ( $F_d$ ) e de delaminação ajustado ( $F_{da}$ ) obtidos sob as condições a seco e com resfriamento criogênico em função dos avanços (f). Observa-se que os valores de  $F_d$  na condição a seco são menores nos avanços de 45, 90 e 180  $\mu\text{m}/\text{rot}$  em comparação com os valores da condição criogênica, com exceção do avanço de 360  $\mu\text{m}/\text{rot}$  onde são bem próximos, indicando que a furação a seco apresenta uma melhor performance nos três primeiros avanços. Nota-se também que na condição a seco, o avanço de 90  $\mu\text{m}/\text{rot}$  apresentou o menor valor de  $F_d$ , indicando que possivelmente o tempo do processo não permitiu que calor e o atrito gerado tenham atingido determinada temperatura que alterasse a rigidez da matriz termoplástica. Isso pode ser verificado também na condição criogênica, nesse caso o tempo do processo não permitiu que o resfriamento do nitrogênio líquido aplicado através dos canais de refrigeração da broca, alterasse de certa forma as propriedades mecânicas do compósito. A resistência a tração e o módulo de Young nos compósitos aumentam com a diminuição da temperatura, apud <sup>(6)</sup>. Entretanto, o valor de  $F_d$  na condição criogênica é 33% maior que na condição a seco para o avanço de 90  $\mu\text{m}/\text{rot}$ , o qual apresentou o maior número de rebarbas comparado com os outros avanços. Outro tópico que se destaca e merece ser investigado é no avanço de 360  $\mu\text{m}/\text{rot}$ , onde o valor

obtido de  $F_d$  na condição a seco apresenta-se maior que na condição com resfriamento criogênico.

Na comparação entre os fatores  $F_d$  e  $F_{da}$  observa-se que os valores são próximos nas duas condições, nos quatro avanços. Isso ocorre em função da área danificada delaminada ( $A_d$ ) ser consideravelmente pequena, no entanto, a diferença pode aumentar com o aumento da área danificada delaminada <sup>(9)</sup>. Sendo assim, os resultados mostram que no caso do material do presente estudo, deve ser realizada análise mais aprofundada sobre a  $A_d$ , pois tanto na condição a seco como no resfriamento criogênico, os valores de  $F_d$  e  $F_{ad}$  nos avanços de 45 e 180  $\mu\text{m}/\text{rot}$  estão próximos, confrontando a expectativa de que o avanço de certa forma regula o dano <sup>(10)</sup>.

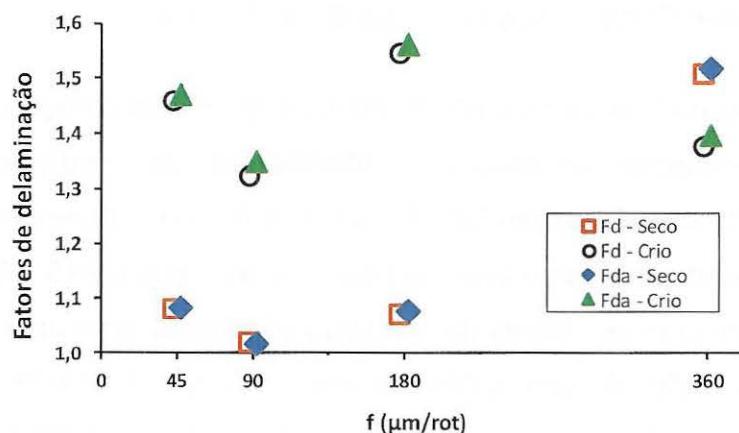


Figura 7 – Fatores de delaminação versus avanço nas condições a seco e com resfriamento criogênico, com velocidade de corte( $V_c$ ) de 60m/min.

#### Proposta de Avaliação da Espessura do Dano ao Redor do Furo ( $h_d$ )

A Figura 8 mostra os valores da espessura do dano ao redor do furo ( $h_d$ ) dos 16 corpos de prova, obtidos sob condições a seco e com resfriamento criogênico em função dos avanços. Nota-se que na condição a seco, nos avanços de 45 e 90  $\mu\text{m}/\text{rot}$  apresentam os menores valores de  $h_d$  em comparação com os demais, bem como menor dispersão dos resultados. Entretanto, os valores de  $h_d$  apresentam-se próximos no avanço de 360  $\mu\text{m}/\text{rot}$  nas condições a seco e com resfriamento criogênico. Nesse contexto, estudos

devem ser aprofundados para melhor entendimento da área danificada ( $A_d$ ) correlacionada com a espessura de dano ( $h_d$ ), para uma avaliação global de dano estrutural.

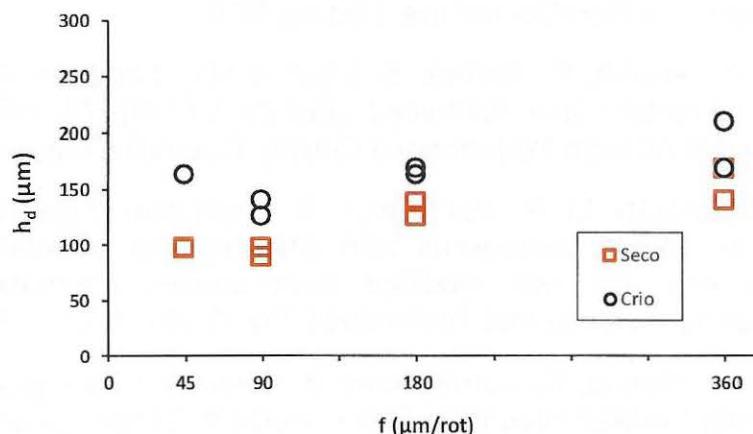


Figura 8 – Espessura de dano ( $h_d$ ) versus avanço nas condições a seco e com resfriamento criogênico, com velocidade de corte ( $V_c$ ) de 60m/min.

## CONCLUSÕES

A técnica de microtomografia computadorizada de raios-X mostrou-se eficiente para obter informações bi e tridimensional de danos na região de furo nas condições a seco e com criogênica. Os resultados obtidos dos fatores de delaminação convencional ( $F_d$ ) e ajustado ( $F_{d_a}$ ) na saída do furo, indicam que o processo de furação a seco é o mais adequado para o compósito laminado Poli-Sulfeto de Fenileno-Carbono (PPS-C) em comparação com o resfriamento criogênico. Estudo deve ser aprofundado sobre a proposta de avaliação da espessura de dano ( $h_d$ ) quanto a definição de um novo critério de dano estrutural em laminados compósitos submetidos a usinagem por furação.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as empresas Tencate, Seco Tools e Semper Crio pela contribuição desse trabalho.



## REFERÊNCIAS

1. Schuhmacher, S., Daubert, K., Schoen, G., Haeger, A., Lissek, F., Schneider, G. Quantifying Drilling Induced Delamination in Carbon-Fibre-Reinforced Epoxy Laminates Using a Fast, Manual and Mobile Ultrasonic-Based Procedure as Compared to Low-Magnification Microscopy. 19th World Conference on Non-Destructive Testing, 2016.
2. Gupta, A., Ascroft, H., Barnes, S. Effect of chisel edge in ultrasonic assisted drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP). 7th HPC 2016 – CIRP Conference on High Performance Cutting. Chemnitz, Germany, 2016.
3. JENARTHANAN, M. P.; JEYAPPAUL, R. Evaluation of machinability index on milling of GFRP Composites with different fiber orientations using solid carbide end mill with modified helix angles. International Journal of Engineering, Science and Technology, Vol. 6, No. 4, pp. 1-10, 2014.
4. Pejryda, L., Benob, T., Carmignatoc, S. Computed Tomography as a Tool for Examining Surface Integrity in Drilled Holes in CFRP Composites. 2nd CIRP 2nd Conference on Surface Integrity (CSI), 2014.
5. Rachid M'Saoubi , Dragos Axinte, Sein Leung Soo, Christoph Nobel, Helmi Attia, Gregor Kappmeyer, Serafettin Engin. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials. CIRP Annals - Manufacturing Technology 64. pg. 557–580, 2015.
6. XIA, T.; Investigation of Drilling Performace in Cryogenic Drilling on CFRP Composite laminates. Theses and Dissertations--Mechanical Engineering. 36. [https://uknowledge.uky.edu/me\\_etds/36](https://uknowledge.uky.edu/me_etds/36). 2014.
7. Bhudwannachai, P. Performance Evaluation and Analysis of the Use of CO<sub>2</sub> Cooling for Conventional Drilling of Carbon Fibre Reinforced Plastics. A thesis submitted for admission to the degree of Doctor of Philosophy. University of Warwick, December 2014.
8. Chen WC., "Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre-reinforced plastic (CFRP) composite laminates", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 37, 1097-1108, 1997.
9. DAVIM, J. P.; RUBIO, J. C.; ABRAO, A. M.: A Novel Approach Based on Digital Image Analysis to Evaluate the Delamination Factor after Drilling Composite Laminates. Composites Science and Technology, p. 1939 – 1945, 2007.
10. BATISTA, M. F.; RODRIGUES, A. R; BASSO, I. F.; TOTI, F. A.; OLIVEIRA, F. B. Method for Assessing Hole Damages in Composite Materials. 9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF, Joinville, Santa Catarina, Brasil, 2017.