

**ESTUDO DE DESGASTE DE FRESAS DE TOPO NA FURAÇÃO DE PLACAS LAMINADAS DE FIBRA DE CARBONO****WEAR STUDY OF ENDMILLS IN DRILLING OF LAMINATED CARBON FIBER PLATES**

**Márcio Marques da Silva<sup>1, i</sup>**  
**Alessandro Roger Rodrigues<sup>2, ii</sup>**  
**Luís Davi dos Santos Oliveira<sup>3, iii</sup>**

Data de submissão: (07/06/2024) Data de aprovação: (19/06/2024)

**RESUMO**

O processo de usinagem de Materiais Compósitos Reforçados por Fibras Sintéticas (MCRFS) difere da usinagem convencional de materiais metálicos. MCRFS possuem propriedades abrasivas e produzem cavacos em forma de pó, embora fáceis de usar e dispensem o uso de refrigerantes, a remoção dos cavacos é recomendada ser feita por meio de aspiração. O processo de furação em MCRFS é muito utilizado na manufatura de peças e equipamentos em várias áreas da engenharia, porém é notável ocorrer o fenômeno de delaminação o que é nocivo ao desempenho dos compósitos, contribuindo para propagação de trinca e falha prematura do MCRFS. Este trabalho estudou o desgaste de fresas inteiriças na furação helicoidal de placas de compósitos laminadas com fibras de carbono.

**Palavras-chave:** materiais compósitos; furação; mapa acústico; delaminação.

**ABSTRACT**

The machining process for Synthetic Fiber Reinforced Composite Materials (MCRFS) differs from the conventional machining of metallic materials. MCRFS have abrasive properties and produce chips in powder form, although they are easy to machine and do not require the use of coolants, chip removal is recommended by vacuuming. The MCRFS drilling process is widely used in the manufacture of parts and equipment in various areas of engineering, however, the phenomenon of delamination is notable for occurring, which is harmful to the performance of composites, contributing to crack propagation and premature failure of the MCRFS. This work studied the wear of solid cutters in helical drilling of composite plates laminated with carbon fibers.

**Keywords:** composite materials; drilling; acoustic map; delamination.

**1. INTRODUÇÃO**

Usinagem de materiais compósitos requer certos cuidados como o efeito de delaminação e a abrasividade que desgasta as ferramentas o que difere da usinagem de materiais tradicionais que produzem cavacos bem definidos (Ferraresi, 2013), ao contrário

<sup>1</sup> Doutor em Engenharia Mecânica pela EESC-USP em 2015. Professor na Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. E-mail: marcio.msilva@sp.senai.br

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Mecânica pela USP em 2005. Professor Associado da USP. E-mail: roger@sc.usp.br

<sup>3</sup> Graduando na Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. E-mail: luisdavi2222@gmail.com

produzem cavacos em forma de pó (Rubio, 2007) e requerem certos cuidados e uso de proteção individual específicos, como máscara antigases. O processo de furação em compósitos em geral é realizado por meio de brocas helicoidais que pode ser realizada na maioria das máquinas ferramentas (Batista, 2017). O processo de furação por meio de fresa com estratégia de interpolação helicoidal é uma operação que necessita de máquinas ferramentas que possam realizar os movimentos necessários (Silva, 2023) [4].

A furação por interpolação helicoidal permite controlar dimensão, rugosidade e delaminação melhor que o processo realizado com brocas. Com uma mesma ferramenta (fresa) é possível realizar furações com uma gama de dimensões com precisão e sem a necessidade de trocar a ferramenta para alterar a dimensão do diâmetro. Nesse processo é possível realizar furos com dimensões diferentes das brocas convencionais disponíveis no mercado (Silva, 2023).

### **1.1 Problema de pesquisa**

Delaminações que ocorrem devido o processo de furação, determinar a vida útil de ferramentas utilizadas na usinagem de MCRFS e estabelecer uma associação entre desgaste das ferramentas e delaminação.

### **1.2 Objetivo(s)**

Estudar o fenômeno de delaminação pelo processo de furação com ferramenta inteira, comparar vários tipos de ferramentas variando geometria e revestimentos, determinar as delaminações em função do desgaste e estabelecer uma associação entre desgaste e delaminação.

### **1.3 Justificativa**

Estudo desenvolvido entres EESC-USP e Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. Apresentar um estudo sobre resultados da usinagem de MCRFS por meio de ferramenta inteira e estudar a relação desgaste e delaminação.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

Os processos de usinagem têm uma importância significativa dentro dos atuais sistemas produtivos de fabricação mecânica. A forte concorrência mundial gerou a procura por processos de usinagem mais econômicos, com grande capacidade de remoção de cavacos e que produzam peças com elevada qualidade.

Na indústria aeronáutica, por exemplo, nas quais se utilizam operações de usinagem, a furação é uma das operações usadas para a fixação de placas de materiais compósitos, assim como para fazer reparos estruturais (Rubio,2007).

Os principais defeitos causados pela operação de furação são: danos à entrada do furo, defeitos de circularidade, danos causados pela temperatura na parede do furo e delaminação na saída do furo. Dentre os defeitos, a delaminação parece ser o mais crítico. Segundo Khashaba et al. (2004), a furação é geralmente um processo final, qualquer defeito durante esse processo conduz a rejeição da peça.

Usinagem em rampa circular (também chamada de interpolação helicoidal, interpolação espiral, furação orbital etc.) é um movimento simultâneo em um percurso circular (X e Y) junto com um avanço axial (Z) em um passo definido, e também é uma alternativa à furação. A usinagem em rampa circular é sempre mais recomendada que a usinagem em rampa linear (canais em cheio) porque a interpolação helicoidal é um processo

mais suave uma vez que o corte radial é reduzido. Ela permite o fresamento concordante puro e melhora o escoamento de cavacos. Uma rotação no sentido anti-horário garante o fresamento concordante (Sandvik).

### 3. METODOLOGIA

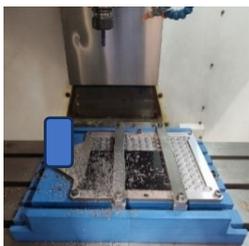
**1.4 Materiais:** Para a realização deste trabalho foram utilizadas cinco fresas inteiriças de metal duro com revestimentos, durezas e geometria diferenciadas com dimensões de 10mm de diâmetro e 100mm de comprimento. A usinagem foi realizada no centro de Usinagem D400 Romi e as medições foram realizadas em altímetro digital TESA micro-hite M600 e no microscópio laser confocal Olympus OLS 4100. Placas laminadas em fibra de carbono Sarja 2x2 e fio 3k de 5mm de espessura foram os corpos de prova. A figura 1 ilustra as placas fixadas no centro de usinagem.

**1.5 Estratégia de usinagem:** Os furos foram usinados com 15mm de diâmetro. Para o processo de furação foi utilizado interpolação helicoidal, que permite controlar o diâmetro do furo com precisão. A rotação adotada foi de 7.000 rpm, velocidade de avanço de 1680mm/min e profundidade de usinagem de 1mm por volta. A figura 2 ilustra a estratégia utilizada e os componentes do estudo.

**1.6 Usinagem:** As ferramentas foram caracterizadas antes e depois de cada ciclo de usinagem de oitenta (80) furos. O microscópio confocal gerou imagens dos gumes de corte que permitiu a medição em escala micrométrica. O instrumento também gerou imagens tridimensionais de varredura por laser.

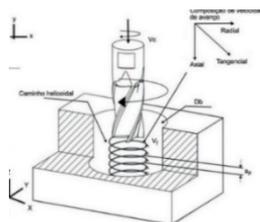
**1.7 Análise:** Os dados foram analisados e confrontados: desgastes, tipo de ferramenta, dureza da ferramenta, delaminação externa e interna, etc. Publicações acadêmicas tem sido realizada mediante os resultados do trabalho.

Figura 1 - Dispositivo de fixação, ferramenta e placa de carbono.



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 2 - Estratégia de usinagem dos furos.

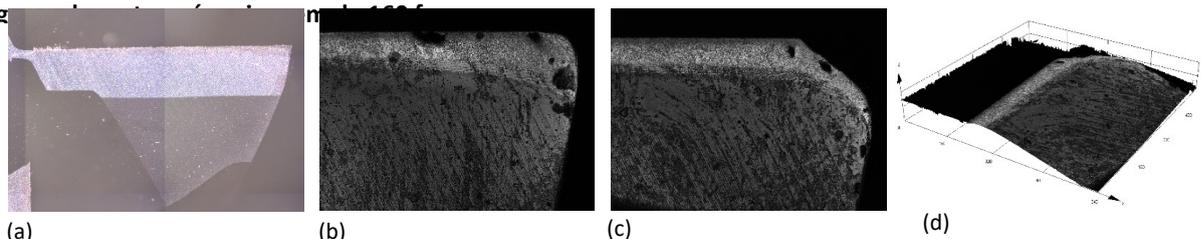


Fonte: Editora Aranda, (2023).

## 2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os desgastes apresentados pelas ferramentas foram mensurados e a abrasividade do material mostrou um comportamento peculiar de polimento e arredondamento do gume de corte. A figura 3 ilustra as imagens geradas pelo confocal de uma das ferramentas antes e depois da usinagem dos furos.

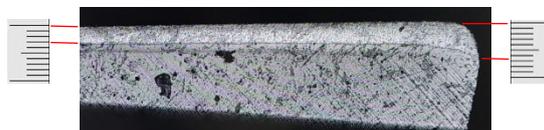
**Figura 1 - Imagens geradas pelo instrumento confocal. (a) fresa com gume de corte novos. (b) gume de corte após usinagem de 80 furos. (c) gume de corte após usinagem de 160 furos. (d) imagem tridimensional do gume de corte após usinagem de 160 furos.**



Fonte: Elaborada pelo autor

O desgaste foi maior na periferia e diminuiu à medida que se aproximava do centro, comprovando a teoria do desgaste estar relacionado com a velocidade de corte. A figura 4 ilustra o gradiente do desgaste no gume de corte.

**Figura 2 - Imagem gerada pelo instrumento confocal. Gradiente de desgaste no gume de corte da ferramenta.**



Fonte: Elaborada pelo autor.

As delaminações se mantiveram um bom comportamento durante a usinagem. Após um aumento considerável do desgaste, as delaminações começaram a apresentar um leve aumento. As placas estão sendo analisadas em laboratório para imagem por scanner e até o momento da escrita do artigo, não foi possível obter as imagens das delaminações após a usinagem dos 160 furos. Porém, a imagem dos primeiros furos, ilustrado na figura 5, mostra o comportamento da delaminação nos primeiros furos usinados.

**Figura 3 - Delaminação provocada pela usinagem com ferramenta inteiraça.**



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 3 CONCLUSÃO

O estudo do desgaste das ferramentas por meio de ferramenta inteiraça e com estratégia de interpolação helicoidal se mostrou viável analisando as delaminações, ver

comparação com trabalho de Batista (2017). O efeito da delaminação começou a aumentar, porém não significativamente, após o desgaste da ferramenta exceder a 0,03mm. Essa delaminação não mostrou a necessidade da troca da ferramenta.

O estudo ainda está em curso. Com a evolução do desgaste das ferramentas e análise da delaminação poderemos estipular uma vida útil da ferramenta em função do desgaste e da delaminação.

## REFERÊNCIAS

BATISTA M. F. *et al.* Method for assessing hole damages in composites materials. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO – COBEF, 9., Joinville, SC: ABCM, 2017. [Anais...]. Disponível em: <https://www.fatecsorocaba.edu.br/nucleos/naap/METHOD-FOR-ASSESSING-HOLE-DAMAGES-IN-COMPOSITE.pdf>. Acesso em: 18 mai. 2024.

EDITORA ARANDA. **Estratégia de usinagem dos furos**, jan 2023. Disponível em: [https://issuu.com/aranda\\_editora/docs/mm\\_dezembro\\_22](https://issuu.com/aranda_editora/docs/mm_dezembro_22) . Acesso em: 25 ago. 2023.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2013. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 18 maio 2024.

KHASHABA, U. A. Delamination in drilling GFR-thermoset composites. **Composite Structures**. v. 63, n. 3-4, February-March, pp. 313-327, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(03\)00180-6](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(03)00180-6). Acesso em: 18 mai. 2024.

RUBIO, Juan C. Campos *et al.* Furação com alta velocidade de corte em compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro. **C.Tecn. Mat.**, Lisboa , v. 19, n. 3-4, p. 83-87, jul. 2007 . Disponível em: [http://scielo.pt/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0870-83122007000200010&lng=pt&nrm=iso](http://scielo.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0870-83122007000200010&lng=pt&nrm=iso) . Acesso em: 18 mai. 2024

SANDVIK COROMANT. **Conhecimento em fresamento**. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/ramping>. Acesso em: 03 jun. 2024.

SILVA, M. M. *et al.* **Usinagem de furos em placas laminadas em fibra de carbono por meio de fresa inteira helicoidal com estratégia de interpolação helicoidal e sensor de frequência acústica**. *In*: SIPGem, 7., EESC-USP, Setembro de 2023. Disponível em: <https://ppg-sem.eesc.usp.br/sipgem.html>. Acesso em: 18 mai. 2024.

## AGRADECIMENTOS

Aos técnicos e pessoas de ambas as escolas, que estiveram envolvidas com o trabalho dando sua contribuição.

À Faculdade de Tecnologia Senai Antonio Adolpho Lobbe e à Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (EESC-USP) por permitirem acesso aos laboratórios, equipamentos e máquinas.

À Sandvik pela cortesia das ferramentas cedidas para realização do trabalho e em especial ao Sr. Aldeci, Sr. Mário Toyama e Sr. Daniel Reketis quem nos deu assistência e suporte técnico.

Ao doutorando Guilherme Mecellis que nos ajudou nas medições nos laboratórios da EESC-USP com o instrumento confocal.

Ao LAPRAS – Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade da EESC-USP pela liberação de equipamentos de medição e aos Professores Dr. Reginaldo Coelho e Dr. Eraldo Silva, coordenadores do LAPRAS.

## Sobre os Autores

---

### <sup>i</sup> **Márcio Marques da Silva**



Possui graduação em Ciências da Computação pela UNICEP (2002), Mestrado (2005), doutorado (2015) e pós-doutorado (2023) pela EESC-USP. Tem experiência nas áreas de manufatura, manutenção e engenharia. Atualmente é professor de ensino superior na Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. <https://orcid.org/0000-0002-3076-9836>

### <sup>ii</sup> **Alessandro Roger Rodrigues**



Possui graduação e mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista (UNESP) (1998 e 2001) e doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo (USP) (2005). Atualmente é Professor Associado MS-5.2 da Universidade de São Paulo (USP), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC). <https://orcid.org/0000-0003-3536-0885>

### <sup>iii</sup> **Luís Davi dos Santos Oliveira**



Graduando no curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial pela Faculdade de Tecnologia em Mecatrônica Industrial SENAI Antonio Adolpho Lobbe. Tem experiência em usinagem e micro usinagem em máquinas CNC.