

ESTUDO DE DESGASTE DE FERRAMENTAS, DELAMINAÇÃO EM PLACAS DE MATERIAL COMPÓSITOS E MONITORAMENTO DE USINAGEM POR MEIO DE SENSOR ACÚSTICO

STUDY OF TOOL WEAR, DELAMINATION IN COMPOSITE MATERIAL PLATES AND MACHINING MONITORING BY MEANS OF ACOUSTIC SENSOR

Márcio M. da Silva¹

Alessandro Roger Rodrigues²

Pedro O. Conceição Jr.³

Fábio Romano L. Dotto⁴

Luís Davi dos S. Oliveira⁵

RESUMO

O processo de usinagem de Materiais Compósitos Reforçados por Fibras Sintéticas (MCRFS) apresenta características distintas em comparação à usinagem de materiais metálicos, que geralmente produzem cavacos contínuos, fragmentados e lamelares. Os MCRFS, por sua vez, são abrasivos e geram cavacos em forma de pó. Embora sua usinagem seja geralmente facilitada, recomenda-se a remoção dos cavacos por aspiração, utilizando máscaras e filtros específicos para a segurança dos operadores. A furação é uma etapa crítica na fabricação de peças e equipamentos, mas pode induzir delaminação nas placas de MCRFS, comprometendo seu desempenho e resultando em falhas como trincas e fadiga prematura. Este estudo investiga a utilização de fresas inteiriças na furação de MCRFS, visando minimizar a delaminação, controlar a rugosidade dos furos e avaliar o desgaste das ferramentas. Além disso, foram analisados sinais de emissão acústica durante o processo, com o intuito de gerar dados que subsidiem a utilização de fresas inteiriças na usinagem de compósitos.

Palavras-chave: Materiais compósitos, furação, mapa acústico, delaminação.

ABSTRACT

The machining process of Synthetic Fiber Reinforced Composite Materials (SFRCM) presents distinct characteristics compared to the machining of metallic materials, which generally produce continuous, fragmented and lamellar chips. SFRCM, in turn, are abrasive and generate chips in powder form. Although machining is generally easier, it is recommended to remove chips by vacuuming, using specific masks and filters for operator safety. Drilling is a critical step in the manufacture of parts and equipment, but it can induce delamination in SFRCM plates, compromising their performance and resulting in failures such as cracks and premature fatigue. This study investigates the use of solid cutters in drilling SFRCM, aiming to minimize delamination, control hole roughness and evaluate tool wear. Furthermore, acoustic emission signals were analyzed during the process, with the aim of generating data that support the use of solid cutters in the machining of composites.

Keywords: Composite materials, drilling, acoustic map, delamination.

¹ Docente na Faculdade de Tecnologia do Senai Antonio Adolpho Lobbe. E-mail: marcio.msilva@sp.senai.br

² Docente pela EESC-USP no departamento de Engenharia Mecânica. E-mail: roger@sc.usp.br

³ Docente pela EESC-USP no departamento de Engenharia Elétrica. E-mail: pedro.oliveiracjr@usp.br

⁴ Docente pela EESC-USP no departamento de Engenharia Elétrica. E-mail: fabio.dotto@usp.br

⁵ Discente na Faculdade de Tecnologia Senai Antonio Adolpho Lobbe. E-mail: luisdavi2222@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

O uso crescente de MCRFS nas indústrias aeroespacial e automotiva, devido à sua leveza, baixa poluição e eficiência energética, tem exigido constante aprimoramento das técnicas de usinagem. No campo aeronáutico, a perfuração de MCRF é uma das aplicações mais frequentes, sendo um método econômico, eficiente e amplamente utilizado para produção de furos (Iliescu, Pora, 2001).

A usinagem de materiais compósitos requer cuidados específicos devido a desafios como a delaminação e a abrasividade, que desgastam as ferramentas de maneira diferente dos materiais tradicionais. Enquanto a usinagem de materiais tradicionais produz cavacos bem definidos (Ferraresi, 1970), a usinagem de compósitos gera cavacos em forma de pó (Rubio, 2007), exigindo o uso de equipamentos de proteção individual, como máscaras apropriadas para evitar a respiração de pó gerado pela usinagem.

Tradicionalmente, o processo de furação em compósitos é realizado por meio de brocas helicoidais, uma técnica aplicável na maioria das máquinas-ferramenta (Batista, 2017). No entanto, a furação por meio de fresa com estratégia de interpolação helicoidal oferece uma abordagem avançada, necessitando de máquinas-ferramenta capazes de realizar movimentos complexos (Silva, 2023).

A furação em MCRF apresenta desafios significativos, como a delaminação. Uma abordagem promissora para superar esses desafios é a furação por interpolação helicoidal, que permite controlar melhor a dimensão, rugosidade e delaminação em comparação com o uso de brocas. Com uma única ferramenta (fresa), é possível realizar furos de várias dimensões com precisão, sem a necessidade de trocar a ferramenta, permitindo furos de tamanhos diferentes das brocas convencionais disponíveis no mercado (Silva, 2023).

A delaminação é um problema que afeta o desempenho dos componentes de MCRF, pois pode propagar trincas e gerar falhas prematuras, que podem comprometer a integridade estrutural do componente e levar a falhas prematuras. Este fenômeno pode ser observado na entrada e saída das ferramentas nos furos usinados. Embora os esforços de corte sejam baixos, o desgaste e arredondamento dos gumes de corte influenciam a ocorrência de delaminação, por isso o controle do desgaste, arredondamentos, trincas e lascamentos dos gumes é crucial para minimizar a delaminação e prever a vida útil da ferramenta antes da sua substituição ou afiação.

O controle e predição da vida útil da ferramenta impactam diretamente nos custos e na prevenção de falhas dos componentes de CFRP, sendo relevante para diversos setores da engenharia e manufatura. Para garantir a eficiência e a qualidade da furação por interpolação helicoidal, é essencial monitorar o desgaste da ferramenta e a evolução da delaminação à medida que a ferramenta vem se desgastando. Esse estudo tem por base a medição em tempo real, por meio de monitoramento de frequência acústica, o desgaste da ferramenta facilitando a tomada de decisão do usuário a continuidade do processo de usinagem.

1.1 Problema de pesquisa

A principal problemática desta pesquisa é abordar as dificuldades do processo de furação em compósitos, que incluem a delaminação resultante do processo, a dificuldade de prever o fim da vida útil das ferramentas antes que a delaminação se torne excessiva, o desgaste provocado pela furação e o estudo das respostas acústicas geradas pelo processo. Estas respostas acústicas podem auxiliar na

detecção instantânea do momento em que as ferramentas devem ser substituídas ou afiadas novamente.

Prever o desgaste da ferramenta em tempo real é um dos maiores desafios nos processos de usinagem. A falta de métodos eficientes de monitoramento impede a substituição preventiva da ferramenta, aumentando o risco de delaminação excessiva e produção de peças defeituosas. Métodos tradicionais de monitoramento são geralmente complexos e dispendiosos, dificultando ainda mais a pesquisa nesta área. Algumas ferramentas são substituídas ou afiadas de a cordo com a decisão do usuário, sem uma metodologia científica.

No entanto, a equipe de pesquisa conseguiu uma parceria entre áreas da engenharia mecânica, elétrica, eletrônica e computação, que permitiu a integração de um sistema de monitoramento por amostragem usando sensores de emissão acústica. Este sistema possibilita a avaliação das ferramentas e das furações após uma quantidade estipulada de furos realizados, proporcionando uma maneira de monitorar o desgaste em tempo real de forma mais prática e acessível.

1.2 Objetivos

- Investigar a aplicação da análise de sinais acústicos para monitoramento em tempo real do desgaste da ferramenta durante a furação de MCRFs, visando a predição da vida útil e otimização do processo.
- Projetar e construir um dispositivo para fixação das placas de MCRF e acomodação do sensor acústico que permita avaliar a resposta acústica.
- Avaliar a influência do material do dispositivo na qualidade do sinal acústico.
- Conduzir ensaios de furação, monitorando o sinal acústico e os parâmetros de usinagem.
- Analisar a correlação entre os sinais acústicos, o desgaste da ferramenta e a qualidade dos furos (delaminação).
- Desenvolver um modelo para prever a vida útil da ferramenta com base nos sinais acústicos e parâmetros de usinagem.

1.3 Justificativa

A motivação para este trabalho surgiu de uma parceria entre a EESC-USP e o SENAI, focada no estudo do desgaste de ferramentas em MCRF. Pesquisas nas bases de dados Scopus e Web of Science orientaram a equipe a estudar o processo de furação em MCRF utilizando fresas inteiriças de metal duro. Além disso, durante os estudos, surgiu a oportunidade de integrar um projeto de pós-doutorado que mensura sinais de emissão acústica no processo de usinagem. Esses sinais são analisados por meio de um programa computacional que gera um mapa acústico do comportamento da usinagem, permitindo estudar e detectar o desgaste, trincas, quebras e perda de corte da ferramenta, bem como falhas no material em corte, como vazios.

A furação em MCRF é propensa a gerar delaminação, a natureza abrasiva dos compósitos resulta em desgaste acentuado das ferramentas, reduzindo sua vida útil e exigindo frequentes substituições. Este desgaste não apenas eleva os custos operacionais, mas também afeta a precisão e a qualidade dos furos, impactando negativamente a eficiência da produção. O alto custo dos materiais MCRF, como fibras de carbono e aramida, assim como das ferramentas de usinagem, torna a pesquisa nessa área ainda mais relevante.

A integração do monitoramento por sinais acústicos se mostrou uma solução promissora e viável, especialmente com a participação de estudos de

pós-doutorado especializados.

Entende-se que esta pesquisa proposta está alinhada com as tendências mundiais, que apontam para a usinagem com monitoramento eletrônico e auxílio de inteligência artificial. A análise de sinais acústicos pode oferecer uma maneira eficiente e acessível de monitorar o desgaste das ferramentas durante a furação de MCRF, permitindo a substituição ou afiação preventiva das ferramentas. Este tipo de monitoramento pode melhorar significativamente a precisão e a qualidade do processo de usinagem, reduzindo custos operacionais e minimizando o risco de falhas estruturais.

Portanto, investigar o potencial da análise de sinais acústicos como técnica de monitoramento é essencial para desenvolver processos de usinagem mais robustos e confiáveis. Esta pesquisa contribui para o conhecimento científico na área de usinagem de compósitos e apresenta soluções práticas para a indústria, promovendo avanços tecnológicos que beneficiarão diversos setores da engenharia e manufatura.

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 econômicos, com grande capacidade de remoção de cavacos e que produzam peças com elevada qualidade. Novas tecnologias, conceitos de automação e estratégias têm sido adotados e implementados com o objetivo de incrementar o desempenho e a eficiência dos processos produtivos.

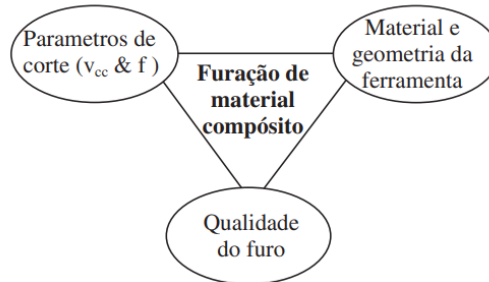
Neste contexto, a tecnologia da usinagem com alta velocidade (HSM - High Speed Machining) ainda figura como um componente essencial na otimização dos esforços para manutenção e aumento da competitividade das empresas, estabelecendo-se como um instrumento indispensável para enfrentar novos desafios, como novos materiais e ferramentas. Na indústria aeronáutica, bem como em vários outros segmentos que utilizam operações de usinagem, a furação é uma das operações frequentemente 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 esses defeitos, a delaminação é considerada o mais crítico. Segundo Khashaba et al. (2004), a furação é geralmente um processo final, e qualquer defeito durante esse processo pode levar à rejeição da peça. Na indústria aeronáutica, a delaminação durante a furação é responsável por 60% das rejeições de peças, gerando um impacto econômico significativo devido ao custo dos processos anteriores. Além disso, de acordo com Elzenheimer et al. (2005), o tempo gasto com a furação é o maior entre as operações executadas com ferramentas de arestas de corte com geometria definida. Segundo Lachaud et al. (2001), Hocheng e Tsao (2003) e Davim et al. (2004), os defeitos causados pela operação de furação podem ser divididos em danos à entrada do furo, defeitos de circularidade, danos causados pela temperatura na parede do furo e delaminação na saída do furo, sendo a delaminação o mais crítico.

Os fatores que influenciam significativamente o processo de furação de CPRF são os parâmetros de corte e a geometria da ferramenta (Figura 1), os quais devem ser escolhidos cuidadosamente para permitir a obtenção de furos de melhor

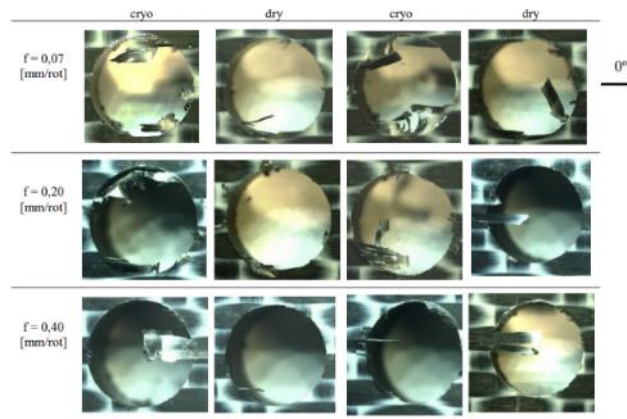
qualidade (Abrão et al., 2007). O efeito de delaminação nas superfícies do material pode causar trincas e a propagação dessas trincas, resultando na falha do componente. Batista (2017) e Rubio (2007) estudaram os efeitos da delaminação no processo de furação com brocas em MCRF, considerando a contribuição da temperatura nesse fenômeno (Figuras 2 e 3).

Figura 1 - Principais aspectos a serem considerados na furação de.



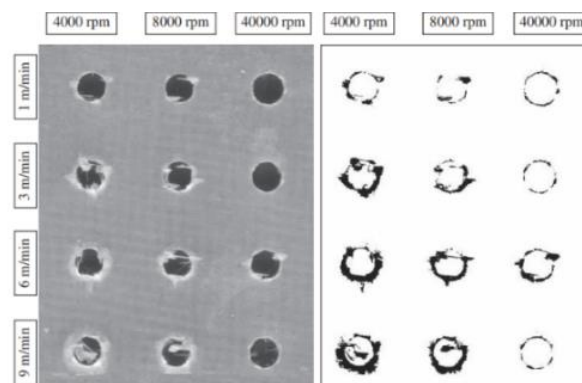
Fonte: Abrão et al., (2007).

Figura 2 - Saída dos furos após furação das brocas.



Fonte: BATISTA (2007).

Figura 3 - Delaminação na superfície de entrada na furação de compósitos laminados de resina epóxi reforçada com fibras de vidro. RUBIO (2007).



Fonte: RUBIO (2007).

As ferramentas utilizadas no processo de furação são de grande relevância na escolha do processo e da estratégia. Em geral, a broca é a primeira ferramenta considerada para furação. Furar com broca é um processo rápido e de tecnologia dominada, mas

cada broca permite abrir apenas um furo do diâmetro específico da ferramenta. O uso da interpolação helicoidal, embora exija movimentos combinados e não possa ser realizado em uma simples furadeira, permite a abertura de furos de várias dimensões com a mesma ferramenta, oferecendo maior controle sobre a dimensão e a rugosidade do furo em comparação com a furação por brocas. A estratégia por interpolação permite um melhor controle da delaminação e da rugosidade dos furos (Silva, 2023).

Com o advento da Indústria 4.0, as áreas de eletrônica, informática, mecânica e automação contribuíram significativamente para os processos de manufatura. O uso de sensores de captação de frequências acústicas durante o processo de furação permite avaliar as mudanças de frequências, criar um mapa acústico e avaliar os desgastes das ferramentas sem a necessidade de removê-las da máquina ou parar o processo. Este método otimiza o tempo de trabalho da ferramenta, aumenta a produtividade e permite um controle preciso da troca ou afiação da ferramenta (Serin, 2020; Lu, 2020; Conceição, 2016).

3 METODOLOGIA

3.1 Máquinas e ferramentas

Para a realização desse trabalho, foram utilizadas ferramentas de metal duro com diâmetro de 10 mm e comprimento de 100 mm. Todas revestidas e com geometria distintas.

Ferramentas: (1) fresa com quatro facas revestida com AlTiN e 50 HRC, (2) fresa com quatro facas com TiSin e 55 HRC, (3) fresa com quatro facas com AlTiSin (nano blue) e 65 HRC, (4) fresa com quatro facas CoroMill Plura® 2P460-AO Sandvik e (5) fresa com seis facas CoroMill Plura® 2P3560-AO Sandvik.

Todas as ferramentas foram programadas com 7.000 rpm, avanço de entrada e saída dos furos em 640 mm/min e usinagem dos furos da entrada à saída em 1.680 mm/min. Isso será mais bem detalhado no item 3.5.

A máquina utilizada na usinagem foi o centro de usinagem ROMI D400 comando GE FANUC Séries-08 MATE-MB.

Sensor de frequência acústica sob patente pela empresa Farol.

Altímetro digital TESA micro-hite M600.

Microscópio laser digital confocal Olympus OLS 4100.

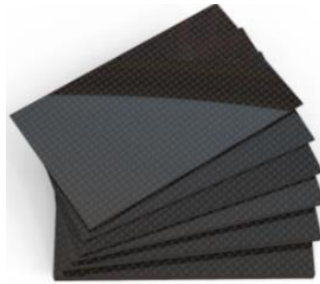
3.2 Material

As placas laminadas de carbono foram adquiridas com recursos da EESC-USP. As placas possuem 5 mm de espessura e são constituídas de resina epóxi com fibra de carbono tipo Sarja 2x2 e fio 3k. Resistência à flexão ASTM D-790 700Mpa. Resistência à Tração ASTM D-638 40 GPa. Dureza Barcol ASTM D-2583 60 Barcol.

Para a fixação das placas e do sensor de frequência acústica, foi projetado e construído um dispositivo que permite fixar as placas de maneira rápida e realizar as furações sem que as ferramentas toquem no dispositivo.

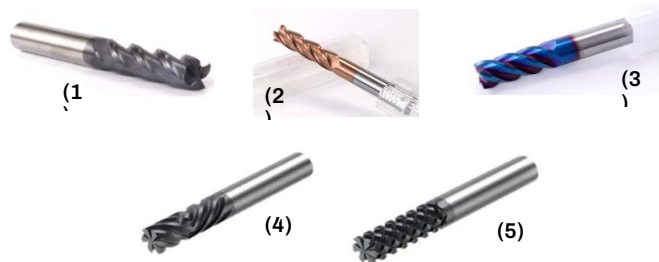
A Figura 4 a seguir ilustra as placas de carbono utilizadas no trabalho e a Figura 5 ilustra as ferramentas utilizadas na usinagem dos furos.

Figura 4 - Placas de carbono epóxi.



Fonte: MinriKangDa. Outubro 2022.

Figura 5 - Fresa de metal duro: (1) revestimento AlTiN 50HRC, (2) revestimento TiSiN 55HRC, (3) revestimento AlTiSiN 65HRC. Fonte: FGEDCS. (4) CoroMill Plura® 2P460-OA e (5) CoroMill Plura® 2P350-OA.



Fonte: Sandvik, outubro 2022.

3.3 Ensaios

Para a realização do trabalho, foi necessário o projeto e construção de um dispositivo para fixação das placas e do sensor de frequência acústica.

Foi realizado um ensaio na EESC-USP testando a resposta acústica de três tipos de material: alumínio, aço e resina PU. Neste ensaio, placas de carbono foram fixadas em três dispositivos com os materiais citados anteriormente. Foram avaliadas as respostas de frequência acústica e a melhor resposta foi na peça em aço, necessitando de pouco ganho no programa para coleta de dados. O segundo material de melhor resposta foi o alumínio e o terceiro e que necessitou de muito ganho foi a resina PU. A Figura 6 ilustra os dispositivos testados.

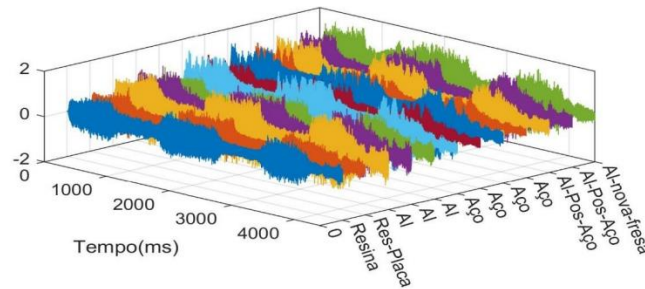
Figura 6 - Figura da esquerda: placa à esquerda inferior feita de resina PU, ao centro placa feita em alumínio e à direita placa feita em aço. Figura à direita: Dispositivo fixado no centro de usinagem com o sensor de frequência acústica.



Fonte: próprio autor. 2022.

A Figura 7 ilustra as respostas acústicas emitidas pelo sensor.

Figura 7 - Gráficos de frequências sonoras captadas pelo sinal do sensor e tratadas por programa computacional Matlab.



Fonte: Próprio autor, 2023.

3.4 Dispositivo de fixação

Para acomodar as placas de carbono e o sensor de captação de frequência foi projetada e construída uma placa em aço carbono, material que demonstrou ser o melhor dentre os estudados na transmissão das frequências.

A placa acomoda as placas de carbono e possui uma geometria com alívios que durante a usinagem, as ferramentas usinam os furos e não toque na placa de aço. Para fixar a placa no centro de usinagem, foi projetado e construído um suporte em resina PU.

O suporte em resina PU é fixado na mesa do centro de usinagem por meio de porcas de fixação e chavetas de posicionamento que permitem a fixação precisa na mesa da máquina.

A placa de aço é fixada na resina PU e as placas de carbono são presas por meio de braços de aço parafusados em porcas móveis na resina PU.

A Figura 8 a seguir, ilustra a placa de aço em carbono, o suporte em resina PU (azul) e o sensor de emissão acústica.

Figura 8 - Dispositivo projetado e construído para acomodar placas de carbono e sensor de frequência acústica.



Fonte próprio autor. 2023.

3.5 Parâmetros de usinagem

Para a usinagem das placas de carbono, segundo recomendação de fornecedores de ferramentas, como a Sandvik que nos cedeu ferramentas para que esse trabalho pudesse ocorrer, o melhor corte para compósitos é a orientação do corte no sentido discordante.

A rotação utilizada nas ferramentas foi de 7.000 rpm e o avanço foi dividido em três etapas: no início, ou abertura do furo, no primeiro milímetro da espessura da placa, o avanço foi de $f = 640 \text{ mm/min}$ ou $f_z = 0,02 \text{ mm}$ por aresta, na etapa entre o início e final do furo, ou nos três milímetros no centro da espessura da placa, o avanço foi aumentado em $f = 1680 \text{ mm/min}$ ou $f_z = 0,06 \text{ mm}$ por aresta e na etapa final, ou último milímetro da espessura, o avanço foi igual ao avanço de entrada.

O avanço na vertical, eixo Z foi de 1 mm por volta, já a interpolação nos eixos X e Y teve um deslocamento em 2,5 mm de raio formando um diâmetro de 5 mm e no centro da fresa, o diâmetro de 15 mm para o furo produzido.

O tempo e o percurso de corte são definidos pela equação:

$$T_c = \frac{L}{V_f} = \frac{\pi \cdot d \cdot 3}{1680} + \frac{\pi \cdot d \cdot 2}{640} = 0,028 + 0,049 = 0,0771 \text{ min ou } 4,63 \text{ s (1)}$$

O percurso de corte por furo é de 78,54 mm e o tempo de corte para cada furo é de 4,63 segundos.

A coleta de dados dimensionais e de emissão acústica é realizada a cada 80 furos usinados. Sendo assim, a coleta de dados ocorre a cada 6283,2 mm de percurso e num tempo de corte de 370,4 s ou 6 min e 10 s. A usinagem foi realizada sem refrigeração. Os cavacos são removidos por meio de aspirador de pó.

3.6 Estratégia de usinagem

A furação por meio de interpolação circular é uma operação trivial na usinagem de peças. A furação por meio de interpolação helicoidal pode ser vantajosa quando se pretende melhorar acabamento, cilindricidade e reduzir as rebarbas nas extremidades dos furos. Sandvik.

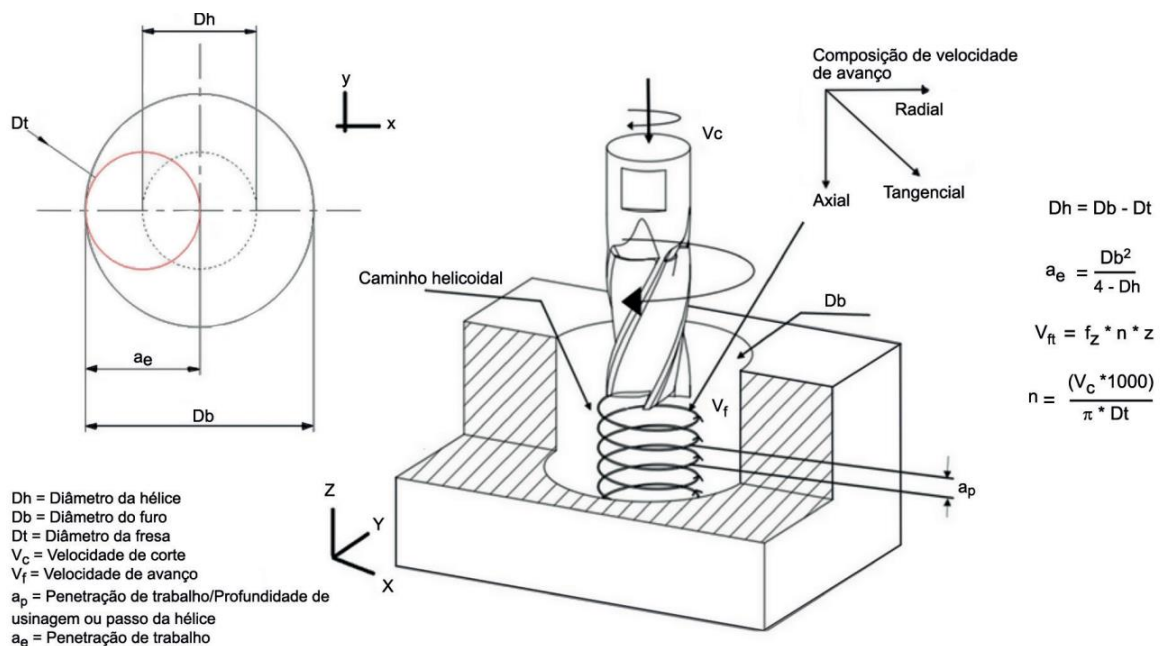
As fresas possuem diâmetro de 10 mm. A interpolação usada foi um raio de 2,5 mm nos eixos X e Y no sentido discordante. O resultado é a abertura de um furo de 15 mm.

Os avanços de entrada e saída em 1mm cada foram realizados com avanços de 640 mm/min ($F=640$) ou 0,02 mm ($f_z=0,02$) por aresta e o movimento do eixo Z, a rampa, foi de 0,5 mm por volta.

Os avanços de usinagem do núcleo da espessura do furo nos 3 mm foram realizados com avanços de 1680 mm/min ($F=1280$) ou 0,04 mm ($f_z=0,04$) por face e o movimento do eixo Z, a rampa, foi de 1 mm por volta.

A Figura 9 ilustra a estratégia de usinagem usada na produção desse trabalho.

Figura 9 - Estratégia de usinagem dos furos.



Fonte: Editora Aranda. Site https://issuu.com/aranda_editora/docs/mm_dezembro_22. Consulta realizada no dia 25 de agosto de 2023.

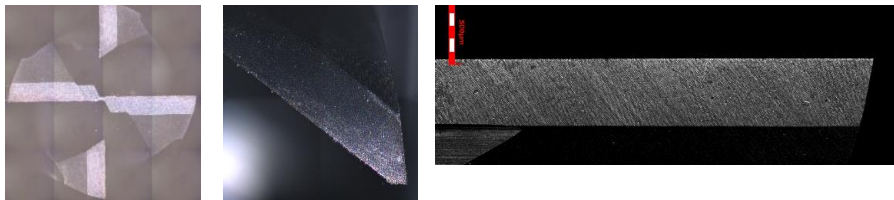
3.7 Procedimentos

As ferramentas foram caracterizadas antes da realização da usinagem, tendo suas dimensões mensuradas em instrumentos digitais na escola Senai, o Altímetro digital TESA micro-hite M600 pelo qual é mensurada a altura da ferramenta e as arestas de corte foram escaneadas no Microscópio Laser Digital Confocal Olympus OLS 4100 no Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade (LAPRAS) da EESC-USP. Após as caracterizações das ferramentas, são usinados os três primeiros furos e são mensuradas as respostas acústicas. O programa computacional gera um mapa acústico e os dados são armazenados.

Após a realização de cada oitenta furos de cada ferramenta, as ferramentas são caracterizadas novamente e é realizada uma nova coleta de emissão acústica de cada ferramenta. Os dados são tratados e armazenados para serem analisados.

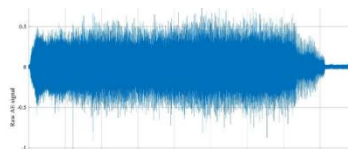
A Figura 10 ilustra as imagens geradas pelo microscópio confocal durante as medições das ferramentas. A Figura 11 ilustra o sinal acústico capturado nos três primeiros furos que a ferramenta executou.

Figura 10 - Ferramenta 1 caracterizada no confocal com seus gumes de corte íntegros.



Fonte: próprio autor: 2023.

Figura 11 - Sinal de frequência acústica nos três primeiros furos.



Fonte próprio autor. 2023.

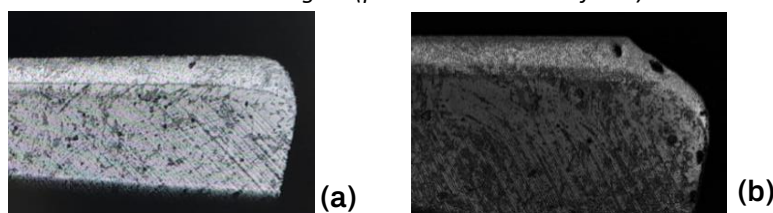
Após a usinagem dos oitenta furos, foram realizados novos ensaios para captação acústica, medição das dimensões da ferramenta para verificar o desgaste de flanco e do gume de corte.

Com esses furos, encerra-se um ciclo de furações. Cada placa de carbono pode ser usinada com cento e sessenta furos, ou dois ciclos de usinagem.

Os dois primeiros ciclos mostraram desgastes consideráveis das ferramentas e desgastes diferenciados das ferramentas. A mudança se refletiu no mapeamento acústico, o que acentuou a mudança frente aos desgastes.

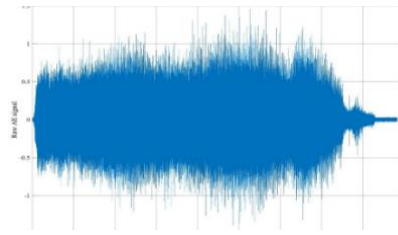
A Figura 12 ilustra os desgastes mensuradas no confocal e a Figura 13 ilustra o sinal emitido pela ferramenta após a usinagem de 80 furos.

Figura 12 - (a) desgaste de flanco após um ciclo de usinagem (80 furos). (b) desgaste de flanco após o segundo ciclo de usinagem (placa toda com 160 furos).



Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 13 - Sinal acústico após usinagem de 80 furos.



Fonte: próprio autor. 2023.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos são divididos em seções: desgastes das ferramentas, mapa acústico, comparativo entre ferramentas, delaminação dos furos, relação entre desgaste e mapa acústico, relação entre delaminação e mapa acústico, relação entre desgaste e delaminação.

4.1 Desgastes das ferramentas

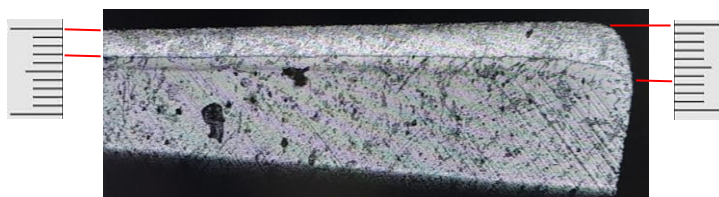
Os desgastes estudados foram analisados em instrumentos de medição. No altímetro digital foram medidas as alturas das ferramentas e constatados os desgastes de flanco frontal. No microscópio confocal foram mensurados os desgastes de flanco lateral, gume de corte frontal e observou-se um arredondamento e polimento dos gumes de corte.

Os desgastes foram maiores nas ferramentas 1, 2 e 3 comparadas às ferramentas 4 e 5 (Sandvik).

Pode ser observado que os desgastes são maiores nas periferias das ferramentas e vão diminuindo para o centro das ferramentas. Comprovando a teoria da relação da velocidade de corte com o desgaste: à medida que o material avança ao centro da ferramenta, a velocidade de corte diminui assim como o desgaste.

A Figura 14 ilustra o desgaste periférico comparado com o desgaste na zona central da ferramenta.

Figura 14 - Desgaste da periferia para o centro da ferramenta.

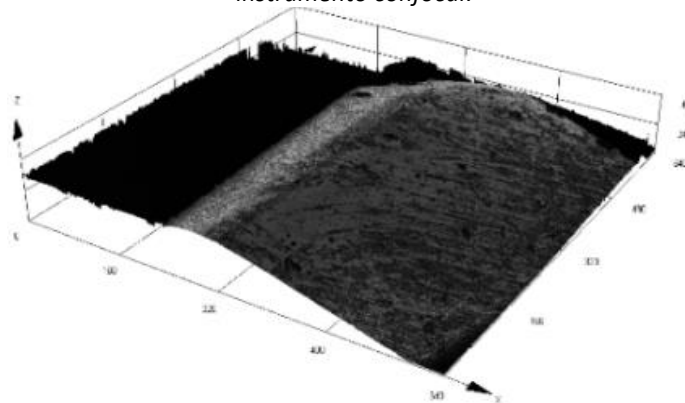


Fonte: próprio autor. 2024.

O microscópio confocal também gerou uma imagem tridimensional mostrando o comportamento do desgaste no flanco frontal da ferramenta. Esse, com maior precisão, pode dar uma ideia do que acontece nos flancos centrais.

A Figura 15 ilustra a imagem tridimensional gerada pelo microscópio confocal, do gume da ferramenta.

Figura 15 - Imagem tridimensional do gume da ferramenta após usinagem de 80 furos realizada pelo instrumento confocal.



Fonte: próprio autor. 2024.

Pode ser observado nos desgastes causados pelo material, pode se observar um arredondamento e polimento dos gumes de corte. Esse arredondamento aumenta a força necessária para cortar, embora não mensurada nesse trabalho, mas que é considerada baixa por se tratar de um material que não requer grandes esforços para realizar um corte.

Porém as consequências do arredondamento podem ser observadas no mapa acústico gerado pelo programa e nas delaminações observadas nas placas usinadas.

4.2 Mapa acústico

A cada medição das frequências geradas pelas ferramentas, pode se observar leves mudanças nos gráficos gerados. Essas mudanças quando contrastadas com os desgastes e com as delaminações, se mostraram coerentes. Houve um aumento nas frequências emitidas durante a usinagem.

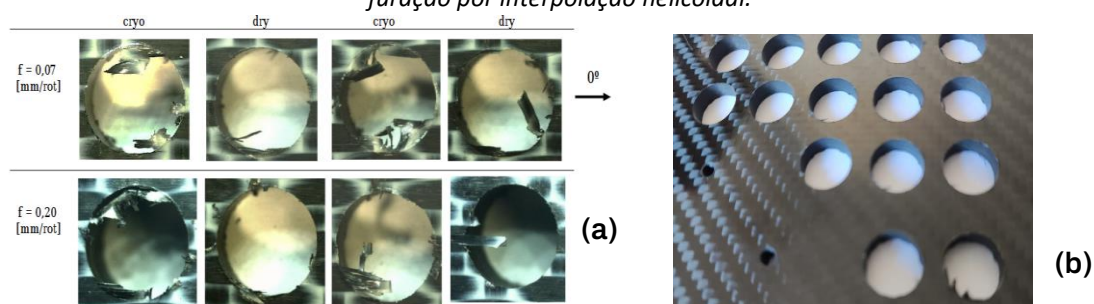
4.3 Delaminação

As delaminações são menores comparadas com as delaminações produzidas por brocas nos trabalhos de RUBIO (2007) e BATISTA (2017). Também é possível ter um controle melhor da rugosidade, entrada e saída da ferramenta.

Com uma mesma ferramenta é possível usinar furos de variadas dimensões respeitando o limite dimensional da ferramenta.

As delaminações preliminares obtidas no trabalho são ilustradas na Figura 16b a seguir.

Figura 16 - Efeito de delaminação (rebarbas) resultante da saída da ferramenta na operação de furação. (a) furação feito por brocas. Fonte: Batista, 2017. (b) furação feito por fresa inteira de MD com estratégia de furação por interpolação helicoidal.



Fonte: (a) BATISTA (2017) e (b) próprio autor. 2023.

5 CONCLUSÃO

5.1 Dos desgastes

O estudo de desgastes de ferramentas inteiriças em usinagem de furos com interpolação helicoidal em compósitos se mostrou um estudo promissor nas pesquisas realizadas nas bases de dados da EESC-USP e isso pode ser comprovado ao longo do trabalho.

Os desgastes em compósitos demonstraram um comportamento diferenciado da que ocorre em usinagem de metais convencionais. A começar pelo cavaco em formato de pó e a abrasividade do material que causou arredondamento e polimento do gume de corte de uma maneira acelerada em comparação aos metais.

Quando o fator força de corte exigia pela máquina, frente aos metais, é levada em comparação, o desgaste fica mais evidente.

Devido a abrasividade do material o desgaste da periferia dos flancos ficou bem evidente comparado ao desgaste na região central da ferramenta.

5.2 Mapa acústico

Em consequência dos desgastes, pode ser observado nas respostas de frequência uma variação no sentido de aumentar o sinal produzido.

Esse dado é relevante para um monitoramento de usinagem para tomada de decisões, seja pelo operador, seja por IA, para efetuar a troca ou afiação da ferramenta devido ao desgaste ou aumento da delaminação no componente.

O estudo do mapa acústico pode ser evoluído para investigações com ferramentas avariadas, não necessariamente desgastadas, para as quais a Inteligências Artificial pode ajudar na tomada de decisões sobre a usinagem.

5.3 Delaminação

A delaminação se mostrou menor e mais controlável quando se usa a estratégia de interpolação helicoidal. As placas já usinadas estão sendo analisadas em um scanner digital para realizar medição das delaminações produzidas e comparar com o desgaste das ferramentas e com as respostas acústicas. Esse estudo sinaliza para mais produção acadêmica.

REFERÊNCIAS

- Abrão, A.M.; Faria P.E.; Campos Rubio J.C.; Reis P.; Davim J. P. **Drilling of fiber reinforced plastics: A review. Journal of Materials Processing Technology.** 2007: 186; 1-7.
- BATISTA M. F. et al. **Method for Assessing Hole Damages in Composites Materials.** COBEF 2017.
- Davim, J. P.; Reis, P.; António, C. C. **Drilling fiber reinforced plastics (FRPs) manufactured by hand lay-up: influence of matrix (Viapal VUP 9731 and ATLAC 382-05).** Journal of Materials Processing Technology. 2004:155-156; 1828-1833.
- Elzenheimer, J.; Liebeck, T.; Tschannerl, M. **Pesquisa mostra que ainda há muito potencial para ser explorado na furação.** Máquinas e Metais. 2005: 470; 40-45.
- FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais.** 1. ed. São Paulo: Blucher, 1970. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 18 maio 2024.
- IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst., vol. 50, no. 1, pp. 137- 148, Jan. 2020.
- G. Serin, B. Sener, A. M. Ozbayoglu and H. O. Unver, **"Review of tool condition monitoring in machining and opportunities for deep learning"**, Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 109, no. 3, pp. 953-974, 2020.

- Hocheng, H.; Tsao, C. C. **Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits**. Journal of Materials Processing Technology. 2003: 140;.335-339.
- Iliescu D., Gehin D., Gutierrez M. E., Girot F. (2010) **Modeling ant tool wear in drilling of CFRP**. Int J Mach Tool Manu 50(2): 204 – 213.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.10.004>.
- Khashaba, U. A. **Delamination in Drilling GFR-Thermoset Composites**. Composite Structures. 2004: 63; 313-327.
- Lachaud, F.; Piquet, R.; Collombet, F.; Surcin, L. (). **Drilling of Composite Structures, Composite Structures**. 2001: 52; 511-516.
- N. Lu, B. Jiang, X. Meng and H. Zhao, "**Diagnosis diagnosticability analysis and test point design for multiple faults based on multisignal modeling and blind source separation**",
- Conceição, P. O. **Estimação espectral do sinal de vibração para o monitoramento do desgaste do dressador de ponta única**. Revista Matéria – Rio de Janeiro. Dezembro de 2016.
- Pora J. **Composite Materials in the Airbus A380 - From History to Future**. Proceedings ICCM-13, Beijing; 2001. p. 1–10.
- RUBIO, J. C. C. et all. **Furação com alta velocidade de corte em materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro**. Artigo publicado no SIDALC em 2007. Disponível em:
http://scielo.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0870-83122007000200010. Acesso em 18 maio 2024.
- RUBIO, J. C. et all. **Furação com alta velocidade de corte em compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro**. Ciência e Tecnologia dos Materiais, VI. 19, nº ¾, 2007.
- Sandvik. <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets> Acesso em maio de 2024.
- SILVA, M. M. at all. **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**. 7º SIPGem EESC-USP. Setembro de 2023. Disponível em:
<https://ppg-sem.eesc.usp.br/sipgem.html>
 7º SIPGem EESC-USP
<https://soac.eesc.usp.br/index.php/SiPGEM/viisipgem/paper/view/3791/2684>
- Engineering proceedings: Damage Detection in Machining Tools Using Acoustic Emission, Signal Processing and Feature Extration. <https://www.mdpi.com/2673-4591/58/1/109>.

AGRADECIMENTOS

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

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

Sandvik pela cortesia das ferramentas cedidas para realização do trabalho. Em especial ao Sr. Aldeci, Sr. Mário Toyama e Sr. Daniel Reketis, que deram assistência e suporte técnico.

Ao Doutorando Guilherme Mecellis que ajudou nas medições com microscópio confocal nos laboratórios da EESC-USP.

Ao LAPRAS – Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade da EESC-USP pela liberação de equipamentos de medição.

Aos Professores Dr. Reginaldo Coelho e Dr. Eraldo Silva coordenadores do LAPRAS.

SOBRE OS AUTORES

i Márcio Marques da Silva



Doutor em Engenharia mecânica pela EESC-USP. Professor de ensino superior na Faculdade de Tecnologia Senai Antonio Adolpho Lobbe.

ii Alessandro Roger Rodrigues



Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo, Brasil (2005). Professor Associado (MS-5.2) da Universidade de São Paulo, Brasil.

iii Pedro de Oliveira Conceição Jr.



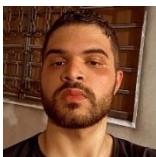
Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) em 2020. Professor na Universidade de São Paulo (USP), lotado na Escola de Engenharia de São Carlos no Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação.

iv Fábio Romano Lofrano Dotto.



Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) em 2019. Professor na EESC-USP no departamento de Engenharia Elétrica.

v Luís Davi dos Santos Oliveira.



Discente na Faculdade de Tecnologia Senai Antonio Adolpho Lobbe no curso de Mecatrônica Industrial.