



ESTUDO DE DESGASTE E RESPOSTAS ACÚSTICAS EM USINAGEM DE PLACAS LAMINADAS DE FIBRA DE CARBONO

STUDY OF WEAR AND ACOUSTIC RESPONSES IN MACHINING OF LAMINATED CARBON FIBER PLATES

Márcio Marques da Silva^{1, i}
Alessandro Roger Rodrigues^{2, ii}
Pedro O. Conceição Jr^{3, iii}
Fábio R. Dotto^{4, iv}
Luís Davi dos Santos Oliveira^{5, v}

Data de submissão: (07/06/2024) Data de aprovação: (26/06/2024)

RESUMO

Os processos de usinagem vêm evoluindo com novas tecnologias. Nos últimos anos, estamos presenciando a quarta revolução industrial onde o monitoramento dos processos de usinagem por meio de sensores vem aprimorando a usinagem, promovendo redução de refugos, melhor controle da vida útil das ferramentas e por consequência melhor produtividade. As informações sobre o monitoramento dos processos de usinagem podem ser enviadas à nuvem e com esses dados, decisões podem ser tomadas quanto aos processos de usinagem. Neste trabalho é abordado o monitoramento por meio de captação de sinal de frequência e a geração de um mapa acústico que permite avaliar as condições da ferramenta, efeito de delaminação no material usinado e contribui com a melhoria da produtividade.

Palavras-chave: monitoramento de usinagem; usinagem de material compósito.

ABSTRACT

Machining processes have been evolving with new technologies. In recent years, we are witnessing the fourth industrial revolution where the monitoring of machining processes using sensors has been improving machining, promoting scrap reduction, better control of tool life and, consequently, better productivity. Information about monitoring machining processes can be sent to the cloud and with this data, decisions can be made regarding machining processes. This work addresses monitoring through frequency signal capture and the generation of an acoustic map that allows the evaluation of tool conditions, the effect of delamination on the machined material and contributes to improving productivity.

Keywords: machining monitoring; composite material machining.

¹ 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

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

³ Doutor em Engenharia Elétrica pela UNESP em 2020. Professor na EESC-USP. E-mail: pedro.oliveira@usp.br

⁴ Doutor em Engenharia Elétrica pela UNESP em 2019. Professor na EESC-USP. E-mail: fabio.dotto@usp.br

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

1 INTRODUÇÃO

O desgaste de ferramentas na usinagem é um dos principais problemas nas indústrias de manufatura. Medições diretas do desgaste da ferramenta, como a observação microscópica, levam ao aumento do desgaste da máquina tempo de inatividade e taxas de produção reduzidas. Para melhorar esta situação, são necessários sistemas de monitoramento da condição da ferramenta (TCMs) em tempo real, que utilizam medição indireta do desgaste da ferramenta por meio de sensores (Bernardes, 2023).

Métodos de monitoramento de usinagem tem sido estudado e explorado. A união das áreas das engenharias mecânica, elétrica, eletrônica e informática têm mostrado resultados promissores.

1.1 Problema de pesquisa

Monitorar o processo de usinagem com o uso de sensor de frequência acústica.

1.2 Objetivo(s)

Estudar e entender o comportamento das respostas acústicas durante o processo de usinagem. Identificar as respostas que indicam o fim da vida útil da ferramenta e identificar por meio da resposta acústica o comportamento do fenômeno de delaminação.

1.3 Justificativa

Estudo desenvolvido entres Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo (EESC-USP) e Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe sobre o comportamento da usinagem e a resposta acústica em materiais compósitos, cujos dados podem ser aplicados a indústria 4.0.

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.

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 (2004), a furação é geralmente um processo final, qualquer defeito durante esse processo conduz a rejeição da peça.

No processo de usinagem de MCRFS, as forças de corte são baixas, porém a abrasividade do material provoca efeitos como desgaste acelerado das ferramentas e arredondamento dos gumes de corte. Esse efeito na ferramenta aumenta o processo de delaminação nos MCRFS. Para o controle desse desgaste das ferramentas, realiza-se inspeção visual e medições por meio de instrumentos mecânicos e eletrônicos. Esse método requer a retirada da ferramenta da máquina e como consequência, a parada do processo de usinagem (Silva, 2023).

O uso de sensor de captação de frequências acústicas durante o processo de furação, permite avaliar as mudanças de frequências acústicas, criar o mapa acústico e avaliar os

desgastes das ferramentas sem a necessidade da remoção da ferramenta da máquina ou parada do processo. Esse processo 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) e Conceição (2016).

3 METODOLOGIA

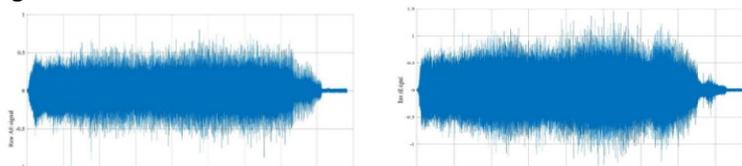
A metodologia adotada para a execução do projeto partiu das etapas de processo de usinagem, captação de sinais, geração de mapa acústico e avaliação de ferramentas e material usinado. Estas etapas estão resumidas a seguir.

- 3.1 **Materiais:** Para a realização deste trabalho foram utilizados um sensor para captação de frequência acústica, placas laminadas de fibra de carbono com resina epóxi Sarja 2x2 e fio 3k de 5mm de espessura, fresas inteiriça de metal duro de diâmetro 10mm e comprimento de 100mm e um dispositivo de fixação para acomodar as placas laminadas de carbono.
- 3.2 **Usinagem:** Mediante um programa elaborado em linguagem ISO G para máquinas de comando numérico computadorizado (CNC), as ferramentas de metal duro realizavam a usinagem de furos com diâmetro 15mm nas placas laminadas de carbono, usando a estratégia de interpolação helicoidal.
- 3.3 **Captação dos sinais:** Os sinais são capturados durante a usinagem de três furos e são enviados à nuvem. Esses sinais são tratados em um programa computacional e um mapa acústico é gerado. Esse mapa permite a avaliação das condições de usinagem, ferramenta e material em processo de usinagem.
- 3.4 **Análise dos dados:** Os desgastes das ferramentas e rebarbas (delaminações) são avaliados e comparadas com os mapas acústicos gerados. Isso gera uma base de dados para auxiliar a tomada de decisão quanto ao processo de usinagem.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os sinais foram captados e armazenados. Os sinais apresentados neste trabalho são os sinais de frequência e de RMS. O estudo ainda não foi finalizado, mas os sinais tem mostrado variação à medida que as ferramentas se desgastam. A figura 1 ilustra o sinal de frequência emitido pela ferramenta quando utilizada pela primeira vez e o sinal emitido após a usinagem de oitenta furos.

Figura 1 - Sinais de frequência acústica emitido pela ferramenta: À esquerda: ferramenta nova. À direita: sinal após a usinagem de oitenta furos.



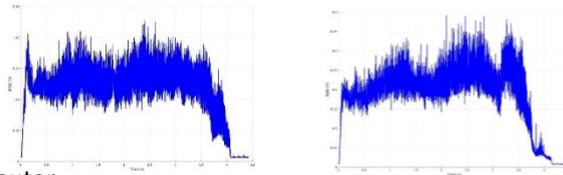
Fonte: elaborada pelo autor.

Por meio da estatística RMS é possível obter um indicador de dano/falha/desgaste. Processamos as amostras do sinal de emissão acústica puro calculando um ponto RMS para cada 1ms. Obtemos, portanto o valor eficaz do sinal e com isso podemos observar melhor as

imperfeições e variações do sinal.

A figura 2 ilustra o sinal RMS captado pelo sensor.

Figura 2 -Sinal RMS captado pelo sensor. À esquerda sinal captado da ferramenta nova. À direita sinal captado após usinagem de 80 furos.



Fonte: elaborada pelo autor.

Os sinais foram captados por contato indireto com as placas de carbono. O sensor foi fixado numa placa onde as placas de carbono são fixadas para usinagem. A placa que acomoda as placas de carbono, foi construída em aço carbono.

Antes do estudo, foram realizados ensaios com três tipos de material para captação do sinal: resina PU, alumínio e aço. A melhor resposta foi captada pela placa em aço carbono.

5 CONCLUSÃO

O comportamento da frequência demonstrou uma relação entre o desgaste da ferramenta e do efeito de delaminação causado nas placas. Esse comportamento mostra viabilidade para aplicação de monitoramento de usinagem em MCRFS por meio de captação de sinal de frequência acústica e sua aplicação no conceito de indústria 4.0.

Por meio desse monitoramento pode ser tomadas decisões quanto a afiação ou troca da ferramenta e o efeito da delaminação nas placas.

Também é proposto o estudo com auxílio de Inteligência Artificial para tomada de decisão durante o processo de usinagem.

A captação dos sinais é realizada com a máquina em operação, isso dispensa a necessidade do operador parar a máquina para avaliar a condição da ferramenta, o feeling pessoal de cada operador para definir o tempo da troca, aumenta a produtividade por diminuir as interrupções do processo e previne quando a geração de refugos por delaminação.

REFERÊNCIAS

BERNARDES, L. et al. Damage detection in machining tools acoustic emission, signal processing and feature extraction. *In: THE INTERNATIONAL ELECTRONIC CONFERENCE ON SENSORS AND APPLICATIONS ECSA*, 10., 15-30 November 2023.

CONCEIÇÃO, P. O. Estimção espectral do sinal de vibração para o monitoramento do desgaste do dressador de ponta única. **Revista Matéria**. Rio de Janeiro. Dezembro de 2016.

KHASHABA, U. A. Delamination in Drilling GFR-Thermoset Composites. *Composite Structures*. 2004: 63; 313-327.

LU, N. 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", **IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.**, v. 50, n. 1, pp. 137- 148, Jan. 2020.

SERIN, G. 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.

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. 7º SIPGem EESC-USP. 2023.

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Tecnologia Senai Antonio Adolpho Lobbe e à Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (EESC-USP).

À Sandvik, ao Sr. Aldeci, ao Sr. Mário Toyama e ao Sr. Daniel Reketis quem nos deu assistência e suporte técnico.

Ao doutorando Guilherme Mecellis que nos ajudou 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

i 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>

ii 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>

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. <https://orcid.org/0000-0002-8476-3333>

iv **Fábio Romano Lofrano Dotto.**



Possui graduação em engenharia elétrica (2001), mestrado em engenharia industrial (2004), doutorado em engenharia elétrica (2019) pela UNESP. Doutor em engenharia eletrotécnica e de computadores pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Portugal (2023). Professor do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da EESC. <https://orcid.org/0000-0002-4892-0450>

v **Luís Davi dos Santos Oliveira.**



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