

MODELAGEM DE PORTA-FERRAMENTAS PARA FRESAMENTO COM AMORTECIMENTO DIFERENCIADO

Gabriel de Moraes Cordeiro, cordeiro.gabriel@aluno.ifsp.edu.br¹

Armando Ítalo Sette Antonialli, antonialli@ufscar.br²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Rua Doutor Aldo Benedito Pierri, 250, Araraquara, SP

²Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos, Rod. Washington Luís, km 235, São Carlos, SP

Resumo. A caracterização dinâmica de processos de usinagem, em especial aqueles que envolvem corte interrompido, como o fresamento, tem se consolidado como uma linha de investigação prioritária na área de manufatura, em virtude da necessidade de mitigar vibrações autoexcitadas - conhecidas como "chatter". Esse tipo de vibração compromete diretamente a vida útil das ferramentas de corte, a integridade superficial das peças usinadas e, por conseguinte, a eficiência global do processo. Nesse cenário, múltiplas abordagens têm sido investigadas com o objetivo de ampliar as margens de estabilidade dinâmica em operação. O presente estudo envolve a modelagem de porta-ferramentas com geometrias internas diferenciadas visando o controle passivo dessas vibrações. A fim de avaliar o desempenho dinâmico dos componentes fabricados, foram conduzidas avaliações analíticas e simulações numéricas. Os resultados indicam que determinadas topologias internas favorecem substancialmente a dissipação de energia vibracional, evidenciando o potencial desses adaptadores para atuarem como dispositivos de controle passivo de chatter. Conclui-se, portanto, que a estratégia adotada representa uma alternativa promissora para o incremento da estabilidade dinâmica e da produtividade em operações de fresamento em regime industrial.

Palavras chave: Dinâmica de usinagem. Vibração autoexcitada. Controle passivo.

Abstract. The dynamic characterization of machining processes, particularly those involving interrupted cutting, such as milling, has become a key research focus in manufacturing due to the need to suppress self-excited vibrations - commonly referred to as chatter. This phenomenon directly affects tool life, surface integrity of machined parts, and, consequently, overall process efficiency. In this context, various strategies have been explored to expand the dynamic stability limits during machining operations. This study proposes modeling toolholders with distinct internal geometries to provide passive control of vibrations. To assess the dynamic performance of the fabricated components, analytic evaluations and numerical simulations were held. The results demonstrate that specific internal topologies significantly enhance vibrational energy dissipation, highlighting the potential of these adapters as passive chatter control devices. Therefore, the adopted approach presents a promising solution for improving dynamic stability and productivity in milling operations under industrial conditions.

Keywords: Machining dynamics. Chatter vibration. Passive control.

1. INTRODUÇÃO

Processos de usinagem com corte interrompido, como o fresamento, apresentam elevada suscetibilidade à ocorrência de vibrações indesejadas, em decorrência da interação entre as frequências naturais do sistema (composto por máquina-ferramenta, ferramenta de corte, sistema de fixação e peça) e a frequência de excitação associada à entrada dos dentes da ferramenta no material. Tal problemática torna-se ainda mais crítica no fresamento de ligas de titânio, cujas propriedades físico-mecânicas - notadamente o baixo módulo de elasticidade e a limitada condutividade térmica - intensificam a variabilidade das forças de corte e favorecem a formação de cavacos segmentados (serrilhados), promovendo instabilidades dinâmicas. Estudos como o de Antonialli, Diniz e Pederiva (2010) demonstram que a utilização de ângulos de posição menores contribui para uma maior estabilidade dinâmica do processo e aumento da vida útil da ferramenta, ainda que ocorra incremento nas forças de corte, uma vez que a energia vibracional resultante tende a concentrar-se em faixas de frequência mais baixas. Ademais, em operações de acabamento, a presença de vibrações pode comprometer significativamente a integridade superficial dos componentes usinados. Savella et al. (2022) evidenciaram, no contexto do torneamento duro do aço H13, que o avanço exerce influência predominante sobre

a vibração em baixas frequências, ao passo que a posição do colo da ferramenta tem impacto mais direto sobre a rugosidade final da superfície. Tais resultados reforçam a relevância da adoção de estratégias eficazes de monitoramento dinâmico e sistemas de fixação otimizados, como forma de assegurar a qualidade dimensional e funcional em processos de usinagem de alta precisão. A usinagem de superfícies curvas envolve variação contínua na área de contato entre a ferramenta e a peça, o que acarreta flutuações significativas nas componentes das forças de corte. Com o intuito de investigar estratégias que minimizem tais variações e otimizem a qualidade superficial, foram avaliadas diferentes abordagens de fresamento em operações de acabamento no aço-ferramenta DIN 1.2436 (D6). Conforme metodologia proposta por Pissolatti et al. (2022), as estratégias testadas envolveram combinações entre os sentidos de avanço (ascendente ou descendente) e a relação de concordância ou discordância com a curvatura da geometria usinada (Figura 1 a)). Os ensaios permitiram comparar os efeitos dessas estratégias sobre a rugosidade superficial, os níveis de força de usinagem e o desgaste da aresta de corte ao final da vida útil da ferramenta. A análise concentrou-se nas regiões críticas da geometria da peça, onde a orientação resultante das forças de corte exerce influência direta sobre a estabilidade do processo e a qualidade do acabamento obtido.

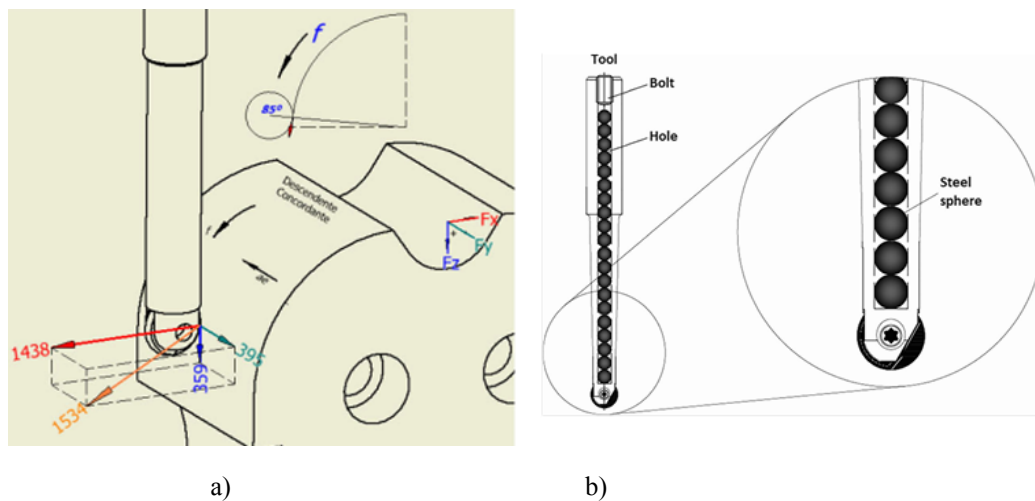


Figura 1: a) Componentes da força de corte no corte descendente concordante. Fonte: Pissolatti et al. (2022). b) Fresa com sistema de amortecimento por impacto. Fonte: Galarza et al. (2020).

Galarza et al. (2020) desenvolveram um sistema de amortecimento por impacto, baseado na inserção de esferas de rolamento no interior de uma fresa de ponta esférica, aplicado à usinagem de superfícies convexas em aço endurecido (Figura 1 b)). Dessa forma, os resultados obtidos evidenciaram diferenças substanciais nos parâmetros de rugosidade superficial e nos níveis de vibração da ferramenta em função da adoção do sistema proposto, com destaque para a mitigação observada nas regiões mais críticas da interface ferramenta-peça.

A vibração autoexcitada, conhecida como chatter, constitui um fenômeno amplamente observado em operações de usinagem, sendo responsável por degradação do acabamento superficial e aceleração do desgaste da ferramenta. Nesse sentido, com o intuito de minimizar tais efeitos, propuseram a utilização de um porta-ferramentas contendo liga com memória de forma (SMA), usualmente aplicada na engenharia civil para a dissipação de energia em estruturas sujeitas a abalos sísmicos. Como resultado, avaliações numéricas e experimentais indicaram melhora significativa no desempenho dinâmico do sistema, com ênfase em faixas específicas de velocidade de corte.

Dessa forma, Andresen, Bäger e Hamm (2020) projetaram estruturas treliçadas irregulares otimizadas para maximização da rigidez específica, fabricadas em alumínio via fusão seletiva a laser (SLM), alcançando incremento de até 58% na primeira frequência natural em comparação com suas contrapartes regulares.

A técnica de SLM, integrante da classe de processos de manufatura aditiva por leito de pó, tem se mostrado eficaz para a produção de geometrias metálicas complexas com propriedades mecânicas satisfatórias. Rosa, Manzoni e Casati (2018) observaram que estruturas treliçadas em aço inoxidável 316L apresentam capacidade de amortecimento superior à de componentes maciços, atribuída à concentração localizada de tensões. Contudo, a literatura ainda apresenta lacunas na caracterização dinâmica dessas estruturas. Nesse contexto, avanços recentes foram realizados por Scalzo et al. (2021), que conduziram análises modais em estruturas treliçadas metálicas operando em faixas de frequência média e alta, observando incremento no amortecimento estrutural mesmo sob condições de rigidez constante, em concordância com os modelos teóricos baseados em Rayleigh.

Em suma, os estudos apresentados evidenciam o potencial de soluções estruturais inovadoras, viabilizadas por tecnologias de manufatura aditiva, na mitigação de vibrações em processos de usinagem, contribuindo significativamente para o aumento da estabilidade dinâmica e da qualidade do processo.

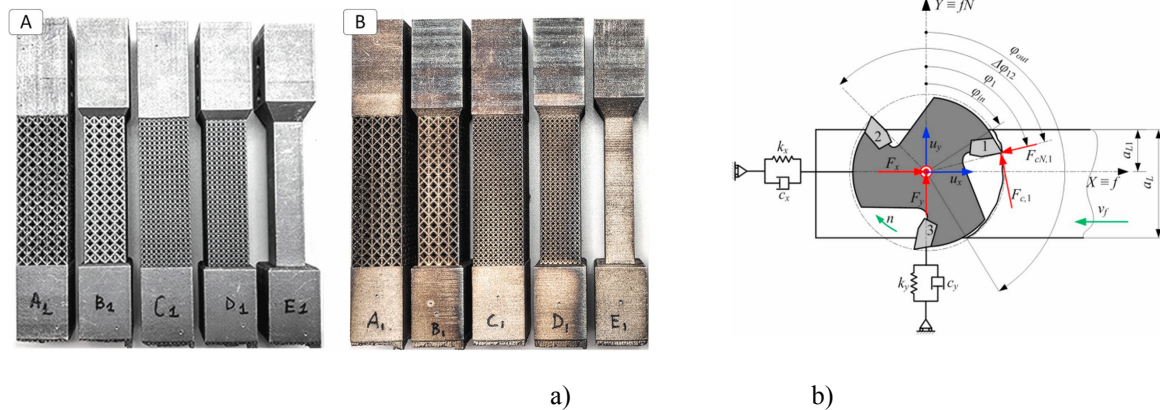


Figura 2 :a) Amostras treliçadas fabricadas por SLM. Fonte: Scalzo et al. (2021). b) Modelo dinâmico de uma fresa com passo diferencial. Fonte: Totis et al. (2019).

A detecção precisa do chatter é essencial para o controle de vibrações em usinagem. Estudos como o de Kuljanic, Sortino e Totis (2008) evidenciam que sensores integrados de força axial e acelerômetros oferecem maior robustez em relação aos sensores simples. Contudo, a limitação dos modelos dinâmicos tradicionais compromete a eficácia de algoritmos preditivos. Para contornar esse problema, Totis (2009) propôs uma abordagem probabilística, introduzindo diagramas de lóbulos não determinísticos. Posteriormente, técnicas como a decomposição wavelet combinadas a redes neurais foram aplicadas para detecção automática do chatter, com bons resultados. Na usinagem de precisão, Sortino, Totis e Prosperi (2013) desenvolveram um modelo híbrido FEM-experimental para prever o comportamento de porta-ferramentas. Além disso, a técnica de variação de velocidade de rotação (SSV) tem mostrado potencial na mitigação do chatter, embora ainda demande algoritmos computacionalmente intensivos para sua parametrização.

2. METODOLOGIA

Apesar de amplamente investigado, o fenômeno do chatter em operações de fresamento permanece como um obstáculo crítico à elevação da produtividade. Nas últimas três décadas, diversas estratégias de mitigação foram propostas, incluindo modulação da velocidade de rotação do fuso, utilização de ferramentas com passo assimétrico ou hélice variável, além de técnicas de controle ativo (Li et al., 2023). Entretanto, soluções baseadas em mecanismos de amortecimento passivo se destacam em ambientes industriais devido à sua simplicidade construtiva, baixo custo e viabilidade de implementação. Nesse contexto, a incorporação de dispositivos de amortecimento — por atrito, impacto ou massas sintonizadas — ao projeto de ferramentas não convencionais ganha relevância, sendo potencializada pelo uso de manufatura aditiva, que viabiliza geometrias complexas e personalizadas. Paralelamente, métodos de otimização topológica têm se consolidado como recursos eficazes para o desenvolvimento de componentes voltados à manufatura aditiva.

Apesar dos progressos, a integração entre a otimização topológica e a manufatura aditiva na concepção de estruturas treliçadas (lattice structures) ainda se encontra em estágio de desenvolvimento. Estudos como o de Zhu et al. (2021) apontam a necessidade de modelos computacionalmente viáveis que considerem fatores como anisotropia e resistência à fadiga para garantir previsibilidade estrutural. Essas estruturas, também denominadas metamateriais porosos, são valorizadas por sua leveza e elevada capacidade de dissipação de energia, sendo classificadas como bidimensionais (convencionais, auxéticas e hierárquicas) ou tridimensionais (baseadas em elementos de barras, placas ou cascas). Yin et al. (2023) destacam o potencial de otimização das células unitárias para maximizar a absorção energética, embora sua aplicação prática nessa finalidade ainda seja limitada — representando, portanto, uma fronteira relevante para investigações futuras.

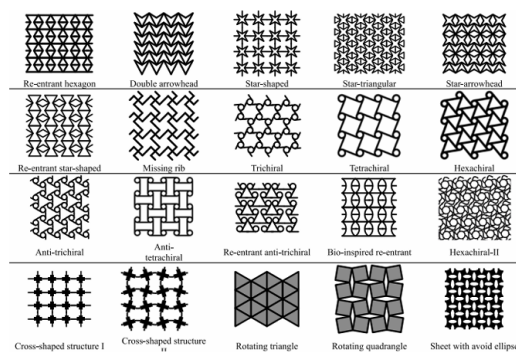


Figura 3: Estruturas em treliça: Fonte: Yin et al. (2023).

As estruturas auxéticas bidimensionais têm despertado interesse significativo devido à sua capacidade de apresentar coeficiente de Poisson negativo, característica que resulta em um comportamento mecânico não convencional e vantajoso para aplicações que demandam elevada capacidade de absorção de energia e resistência ao impacto. No estudo conduzido por Carneiro, Puga e Meireles (2019), foi analisada a configuração hexagonal reentrante (Figura 7) inserida em uma estrutura tridimensional composta por células bidimensionais. Os autores identificaram uma correlação relevante entre o coeficiente de Poisson (ν) e o fator de amortecimento dinâmico (ξ). Entre as geometrias investigadas, destacou-se a estrutura produzida via microfusão em liga de alumínio com ligamentos inclinados a -10° , que apresentou $\nu = -0,34$ e $\xi \cong 0,025$, sendo apontada como a configuração com melhor desempenho mecânico.

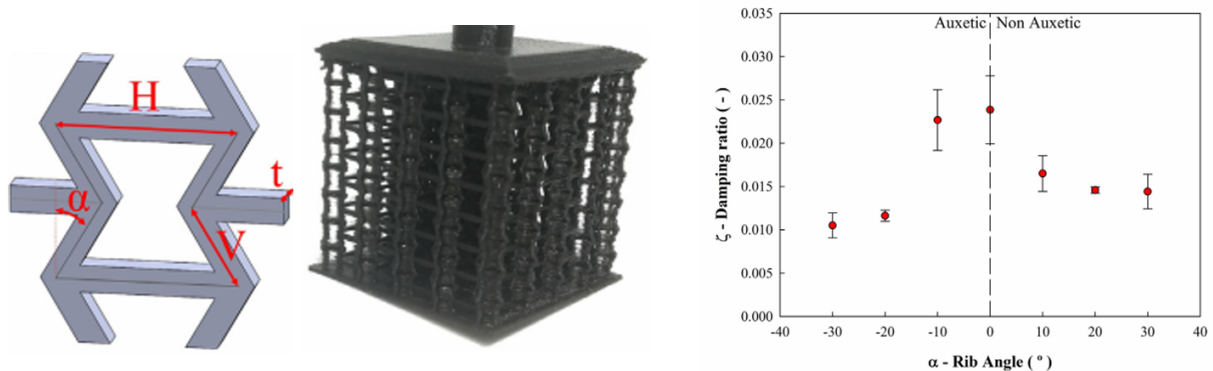


Figura 4: Estrutura auxética hexagonal reentrante e fator de amortecimento. Fonte: Carneiro, Puga e Meireles (2019).

A aplicação de estruturas auxéticas do tipo hexagonal reentrante — genuinamente bidimensionais — fabricadas em ligas de titânio ou compósitos reforçados com fibras de carbono demonstrou eficácia na atenuação de vibrações em centros de usinagem. Kim et al. (2022) relataram uma expressiva redução da amplitude vibracional do eixo-árvore durante operações de fresamento de topo, abrangendo uma ampla faixa de frequências de excitação.

Complementarmente, Yang et al. (2024) exploraram o emprego de manufatura aditiva para integrar estruturas treliçadas com elevada capacidade de dissipação de energia ao corpo de um porta-ferramentas para fresamento, com o intuito de aprimorar sua rigidez dinâmica. Os experimentos evidenciaram que a incorporação de uma estrutura tridimensional baseada em células do tipo cúbico de faces centradas (FCC - face-centered cubic, ou cúbica de faces centradas)) resultou em um incremento aproximado de 18% na rigidez estrutural, em comparação com modelos convencionais maciços. Consequentemente, observou-se o dobro da profundidade de corte limite sob condições estáveis de usinagem de ligas de titânio (Figura 9), demonstrando o potencial da abordagem para operações de alto desempenho.

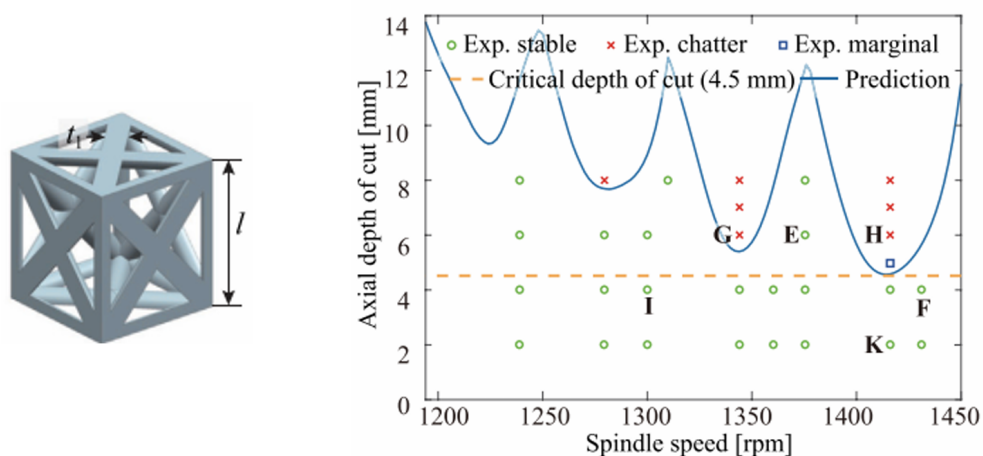


Figura 5: Previsão de estabilidade e resultados experimentais para a estrutura FCC empregada em porta-ferramentas de fresamento. Fonte: Yang et al. (2024).

Scalzo et al. (2021) reportaram um desempenho superior em termos de amortecimento dinâmico na estrutura FBCCZ (Figura 10), uma variação aprimorada da topologia cúbica de corpo centrado (BCC), caracterizada pela adição de elementos estruturais nas diagonais das faces (F) e ao longo do eixo vertical (Z). A configuração foi implementada com células unitárias de 2 mm e barras com diâmetro de 0,4 mm. Como resultado, foram obtidos fatores de amortecimento aproximadamente iguais a $\xi \approx 0,002$ para estruturas produzidas em liga de alumínio e $\xi \approx 0,006$ para aquelas fabricadas em aço inoxidável, representando ganhos significativos em comparação às propriedades de materiais maciços. Adicionalmente, em investigação anterior, Scalzo et al. (2020) demonstraram que a sinergia entre estruturas treliçadas metálicas e o pó não fundido remanescente do processo de fusão seletiva a laser em leito de pó (L-PBF ou SLM) pode atuar como um mecanismo passivo complementar para a atenuação de vibrações autoexcitadas (chatter) durante operações de usinagem, evidenciando o potencial da manufatura aditiva na concepção de dispositivos com capacidade aprimorada de dissipação energética.

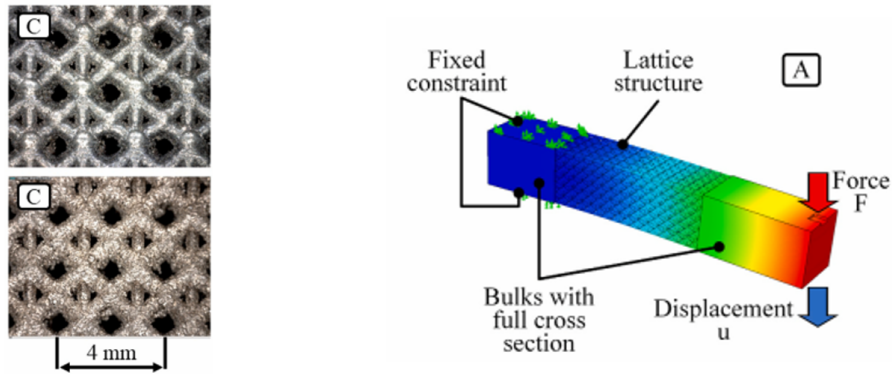


Figura 06: Modelo físico para amostras contendo a estrutura FBCCZ. Fonte: Scalzo et al. (2021).

A consideração de requisitos específicos de projeto é imprescindível, independentemente da morfologia geométrica ou da tipologia estrutural adotada na fabricação por manufatura aditiva. Pelegatti et al. (2024) ressaltaram que metamateriais impressos estão suscetíveis ao fenômeno de degradação cíclica, caracterizado principalmente pela nucleação e pela propagação progressiva de microtrincas, o que compromete de forma significativa sua resistência à fadiga. De forma complementar, Tian et al. (2024) analisaram o comportamento mecânico de corpos-de-prova em aço inoxidável 316L produzidos via fusão seletiva a laser (SLM), identificando a presença de porosidade como o principal fator limitante da vida em regime de fadiga. A atenuação desse efeito deletério pode ser viabilizada mediante a otimização dos parâmetros de processamento na manufatura aditiva, de modo a promover uma fusão mais homogênea e eficiente do material, resultando em maior densificação e redução de defeitos volumétricos internos.

2. RESULTADOS

Considerando a ferramenta de fresamento em balanço como um sistema oscilatório harmônico amortecido com um grau de liberdade (Figura 07), é possível determinar a razão de amortecimento (ξ) em função do coeficiente de amortecimento viscoso (c), da massa do sistema (m) e da frequência natural não amortecida ($\omega_{n,1}$), conforme expressa a Equação 1.

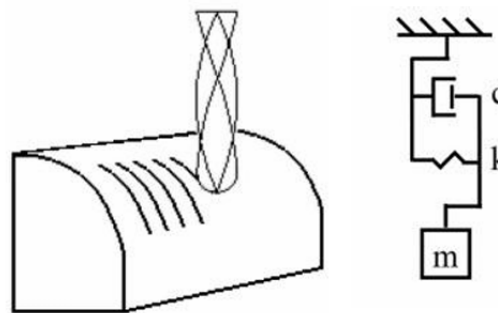


Figura 07: Ferramenta de fresamento como um oscilador harmônico amortecido. (Adaptada de Galarza et al. (2020) e Scalzo et al. (2021))

$$\xi = \frac{c}{2m\omega_{n,1}} \quad (1)$$

$$c = \beta k \quad (2)$$

$$\omega_{n,1} = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ ou } k = m\omega_{n,1}^2 \quad (3)$$

Admitindo-se um modelo clássico de amortecimento de Rayleigh com pico dominante, vide a (Eq. 2) e k é dado pela Eq. 3, a razão de amortecimento pode ser reescrita conforme Eq. 4. Assim, o amortecimento é diretamente proporcional ao produto

$$\xi = \frac{\beta\omega_{n,1}}{2} \quad (4)$$

Assim, torna-se viável promover a elevação da razão de amortecimento ξ por meio de duas abordagens: pelo aumento da constante β ou pelo acréscimo da frequência natural não amortecida $\omega_{n,1}$. O aumento de $\omega_{n,1}$ pode ser alcançado por meio da redução da massa do sistema, desde que essa redução não implique em uma diminuição proporcional da rigidez estrutural (conforme descrito na Equação 3). Como ilustração, considere uma estrutura tubular cuja massa m , para um material com densidade ρ , comprimento L , diâmetro externo D e diâmetro interno d , é determinada pela Equação 5.

A Equação 6 descreve a rigidez equivalente de um modelo de viga em balanço, considerando um material com módulo de elasticidade (E), momento de inércia da seção transversal I , e mesmo comprimento L . Para uma seção anular (coroa circular) com diâmetros externo D e interno d , o momento de inércia I é expresso conforme indicado na equação 7.

$$m = \frac{\rho\pi L}{4}(D^2 - d^2) \quad (5)$$

$$k = \frac{3EI}{L^3} \quad (6)$$

$$I = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4) \quad (7)$$

A reescrita da Equação 3, a partir das contribuições expressas nas Equações 5 a 7, conduz à Equação 8. Esta última evidencia que, para um material com módulo de elasticidade E e densidade ρ fixos, uma viga em balanço com seção transversal tubular (comprimento L e diâmetro externo D) apresentará uma frequência natural não amortecida crescente à medida que se aumenta o diâmetro interno d . Naturalmente, a validade dessa relação está limitada ao domínio matemático $d < D$, conforme impõe a consistência física do modelo.

$$\omega_{n,1} = \sqrt{\left(\frac{12\pi E}{64\pi\rho L^4}\right)\left(\frac{D^4 - d^4}{D^2 - d^2}\right)} = \sqrt{\frac{3E}{16\rho L^4}(D^2 + d^2)} \quad (8)$$

O aumento da ociosidade estrutural da viga, representado pela redução da espessura da parede tubular, acarreta maior flexibilidade do sistema. A receptância estática G pode ser estimada como o inverso da rigidez k ; assim, com base nas Equações 6 e 7, obtém-se a Equação 9, que evidencia o efeito negativo de diâmetros internos d excessivos sobre o deslocamento por flexão. Nessa condição, apesar do aumento em $\omega_{n,1}$ e na razão de amortecimento ξ , a estabilidade do sistema pode ser prejudicada devido à maior sensibilidade às condições iniciais.

$$G = \frac{L^3}{3EI} = \frac{64L^3}{3\pi E} \left(\frac{1}{D^4 - d^4} \right) \quad (9)$$

Como alternativa, pode-se considerar o aumento do coeficiente de Rayleigh como estratégia viável. Scalzo et al. (2021) reportaram resultados significativos para o parâmetro β , ao fabricarem estruturas tridimensionais do tipo treliça em alumínio e aço inoxidável por meio de processos de manufatura aditiva. dicionalmente, mesmo o pó metálico não fundido — residuo inerente aos distintos processos de manufatura aditiva e retido no interior das estruturas — pode, isoladamente, proporcionar uma contribuição relevante nesse contexto. A Figura 13 apresenta o modelo dinâmico de um sistema composto por eixo-árvore, sistema de fixação e a ferramenta especial desenvolvida por Yang et al. (2024), modelado como dois subsistemas distintos.

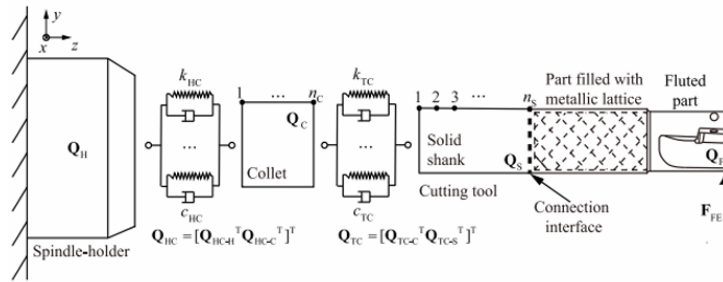


Figura 08: Sistema dinâmico envolvendo uma ferramenta especial. Fonte: Yang et al. (2024)

Identifica-se, nesse contexto, uma oportunidade promissora para a otimização de porta-ferramentas de fresamento, na qual se considere, como variável de projeto, a espessura da parede de seções aproximadamente ocas, bem como a incorporação de estruturas de preenchimento voltadas à mitigação de vibrações indesejadas. No que tange a essa segunda abordagem, observa-se a existência de soluções já consolidadas no mercado desde a primeira década do século XXI, configurando um benchmarking tecnológico (Sandvik Coromant, 2024). Trata-se do conceito de tuned mass damper (TMD), ou amortecedor de massa sintonizada, caracterizado como uma técnica de amortecimento passivo. Essa abordagem possibilitou o desenvolvimento de um TMD integrado, também viável por meio de processos de manufatura aditiva, com elevado potencial de desempenho na operação de fresamento com supressão eficaz de chatter.

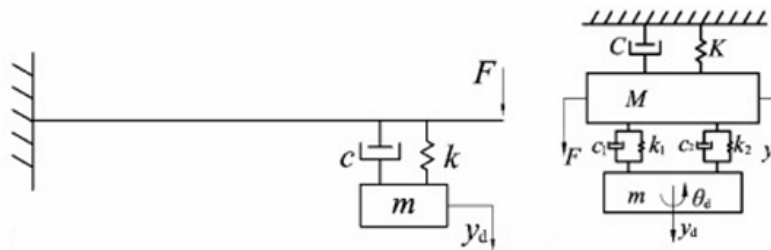


Figura 09: Modelo dinâmico de um sistema TMD . Fonte: Wang et al. (2021).

O comportamento mecânico das diferentes configurações pode ser analisado em ambiente de simulação computacional utilizando o módulo de elementos finitos de um software como o SolidWorks. As primeiras frequências naturais, bem como seus respectivos modos de vibração, podem ser também determinados por meio da análise dinâmica. Com base nesses resultados preliminares, é possível delimitar as fronteiras de estabilidade, alimentando o modelo preditivo desenvolvido por Totis (2017) para a estimativa da ocorrência de chatter regenerativo em operações de fresamento. Tal modelo apresenta desempenho superior aos modelos clássicos, particularmente em aplicações envolvendo ferramentas de elevada rigidez — embora este não seja o caso específico do presente estudo. Portanto, a modelagem analítica desenvolvida neste trabalho oferece uma abordagem robusta e eficiente para prever o comportamento mecânico de estruturas celulares. Diferentemente de métodos puramente numéricos, a solução analítica permite uma compreensão mais direta da influência de parâmetros geométricos sobre a rigidez equivalente, além de possibilitar a obtenção de resultados de forma rápida e com baixo custo computacional. Essa característica torna o modelo uma ferramenta valiosa para o projeto inicial e otimização de componentes estruturais, especialmente em aplicações que demandam agilidade no desenvolvimento e integração de soluções.

3. CONCLUSÃO

Este estudo demonstra, portanto, que porta-ferramentas fabricadas por manufatura aditiva, com cavidades preenchidas por pó metálico não fundido ou integrando amortecedores de massa sintonizada (TMDs), podem apresentar desempenho superior no controle passivo do *chatter*. Utilizando a técnica L-PBF - s Laser Powder Bed Fusion, ou fusão a laser em leito de pó, é possível explorar geometrias internas otimizadas que resultam em elevados fatores de amortecimento. Essas soluções podem ser mostrar tecnicamente viáveis e promissoras para diferentes condições de usinagem, possibilitando ganhos expressivos em estabilidade dinâmica e produtividade em ambiente fabril. Com o avanço das técnicas de manufatura aditiva, torna-se viável a fabricação de estruturas internas com geometrias complexas, como as estudadas neste trabalho. Essa capacidade de produção, aliada à modelagem analítica proposta, abre caminho para o desenvolvimento de componentes personalizados e otimizados para aplicações específicas, aproveitando o melhor dos dois mundos: a liberdade geométrica da impressão 3D e a previsibilidade e eficiência do

modelo matemático. Assim, a integração entre análise teórica e fabricação representa uma direção promissora para projetos avançados em engenharia.

4. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao corpo docente da UFSCar e ao laboratório por meio do Grupo de Pesquisa em Manufatura Inteligente, por todo suporte, auxílio e ajuda no desenvolvimento dessa pesquisa.

5. REFERÊNCIAS

- Andresen, S. et al., 2020, "Eigenfrequency Maximisation by Using Irregular Lattice Structures", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 465, pp. 115027. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.115027>.
- Galarza, F.A.M. et al., 2019, "Design and Experimental Evaluation of an Impact Damper to Be Used in a Slender End Mill Tool in the Machining of Hardened Steel", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 106, No. 5-6, pp. 2553–2567. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04786-8>.
- Hanfeng Yin, Wenzheng Zhang, Liangcong Zhu, Fanbo Meng, Jie Liu, Guilin Wen, Review on lattice structures for energy absorption properties, *Composite Structures*, Volume 304, Part 1, 2023, 116397. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116397>.
- Ítalo Sette Antonialli, Armando, et al., 2010, "Vibration Analysis of Cutting Force in Titanium Alloy Milling." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 50, no. 1, pp. 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.09.006>.
- Jungsub Kim, Himanshu Hegde, Hyo-young Kim, ChaBum Lee, 2022, "Spindle vibration mitigation utilizing additively manufactured auxetic materials", *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 73, Pages 633-641. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.11.051>.
- Korloy, 2024, Damping Pro. Disponível em: [https://www.korloy.com/en/ebook/Damping%20Pro\(EI\)/assets/contents/download.pdf](https://www.korloy.com/en/ebook/Damping%20Pro(EI)/assets/contents/download.pdf). Acesso em: 24 mai. 2024.
- Kuljanic, E., et al., 2009, "Development of an Intelligent Multisensor Chatter Detection System in Milling." *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, no. 5, pp. 1704–1718. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.01.003>.
- Marco Pelegatti, Federico Scalzo, Francesco Sordetti, Emanuele Vaglio, Michele Magnan, Giovanni Totis, Marco Sortino, Denis Benasciutti, Alex Lanzutti, Francesco De Bona, Enrico Salvati, 2024, "Low cycle fatigue behaviour of cellular materials: Experimental comparative study of strut-based and gyroid structures made of additively manufactured 316L steel", *International Journal of Fatigue*, Vol 178, 108024. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.108024>.
- Sandvik Coromant. Silent Tools™ for milling. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/tools/tooling-systems/turning-centres-and-lathes/silent-tools/silent-tools-milling>. Acesso em: 24 mai. 2024.
- Savella, Felipe Bertolotti, et al., 2022, "Analysis of the Effect of Part Geometry and Cutting Parameters over Tool Vibration and Surface Integrity on Hard Turning." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 122, no. 9-10, pp. 4065–4077. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10162-x>.
- Scalzo F., Totis G., Vaglio E., Sortino M., 2020, "Passive Chatter Suppression of Thin-Walled Parts by Means of High-Damping Lattice Structures Obtained from Selective Laser Melting." *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(4):117. <https://doi.org/10.3390/jmmp4040117>.
- Scalzo, F., et al., 2021, "Experimental Study on the High-Damping Properties of Metallic Lattice Structures Obtained from SLM." *Precision Engineering*, vol. 71, pp. 63–77. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.02.010>.
- Totis, G., et al., 2018, "Stability Analysis in Milling by Taking into Account the Influence of Forced Vibrations on the Actual Tool-Workpiece Engagement Conditions." *Procedia CIRP*, vol. 77, pp. 453–456. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.276>.
- Totis, G., et al., 2019, "Symmetry Breaking in Milling Dynamics." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 139, pp. 37–59. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2019.01.002>.
- Yun Yang, Yang Yang, Hua-Chen Liu, Min Wan, Wei-Hong Zhang, 2024, "A new cutting tool filled with metallic lattice and design method for vibration suppression in milling", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 212, 111310. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111310>.
- V.H. Carneiro, H. Puga, J. Meireles, Positive, zero and negative Poisson's ratio non-stochastic metallic cellular solids: Dependence between static and dynamic mechanical properties, *Composite Structures*, Volume 226, 2019, 111239, ISSN 0263-8223

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.