

Características e vantagens do uso de materiais compósitos em máquinas e ferramentas

DOI: 10.5281/zenodo.10569863

Pedro Paulo Marques ^{a*}

This review discusses the design and application of composite materials in machine tools. Some exemplary machine elements, tool structures, and components are presented, and the technical potentials, requirements, and challenges are discussed. The presented prototypes and industrial products show that new degrees of freedom in the design and layout of machine components can be explored, especially when material combinations are implemented.

Esta resenha discute sobre o design e aplicação de materiais compósitos em máquinas-ferramenta. Alguns elementos de máquinas, estruturas de ferramentas e componentes exemplares são apresentados, e são discutidos os potenciais técnicos, requisitos e desafios. Os protótipos apresentados e os produtos industriais mostram que novos graus de liberdade no design e layout de componentes de máquinas podem ser explorados, especialmente quando combinações de materiais são implementadas.

^aUniversidade de Brasília - UnB. Campus Darcy Ribeiro - Instituto de Química

*E-mail: ppmarques01@gmail.com

Palavras-chave: Materiais compósitos; máquinas industriais; ferramentas; otimização de estruturas.

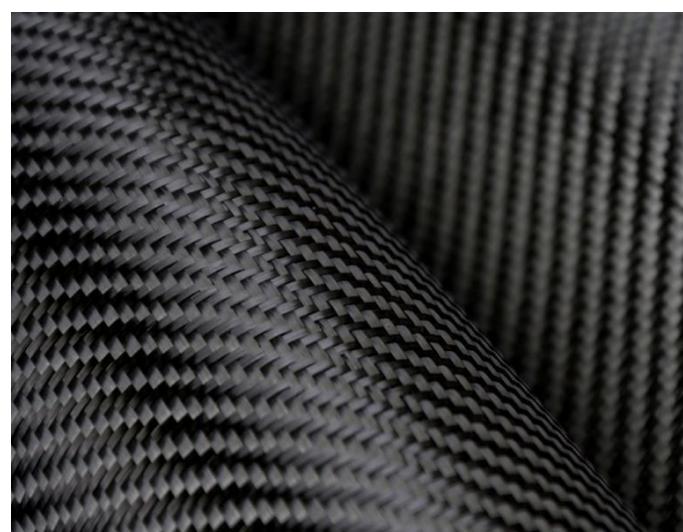
Aceito em 06 de mês de 2023,
Aprovado em 19 mês de 2024,
Publicado em 31 de mês de 2024.

Introdução

Peças compostas referem-se a elementos estruturais formados pela combinação de diversos materiais em uma matriz de polímero reforçado com fibras, tais como carbono, vidro, aramida ou basalto. Além disso, incorporam núcleos celulares, como espuma ou favo de mel, para reforçar a resistência e rigidez. O objetivo principal dessa abordagem é a redução de massa, já que materiais compostos oferecem uma relação resistência-peso superior em comparação com metais convencionais. A economia de combustível é uma consequência direta dessa busca pela redução de massa, especialmente em setores como a indústria automotiva e aeroespacial. Utilizando peças compostas mais leves na fabricação de componentes, como painéis de carroceria, chassis e partes internas em carros esportivos de alto desempenho, como os polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC), contribui não apenas para a eficiência de combustível, mas também aprimora o desempenho global dos veículos. Essa aplicação prática destaca como as peças compostas são integradas estrategicamente para atingir benefícios significativos não apenas em termos de eficiência energética, mas também em relação ao desempenho geral. A natureza leve e resistente dos PRFC exemplifica como a combinação cuidadosa desses materiais pode resultar em uma relação otimizada entre peso e resistência, evidenciando a importância

crescente das peças compostas na indústria automotiva e aeroespacial.¹

Figura 1. Fibra de carbono.



O potencial da construção leve oferece novas possibilidades, como a redução de massas móveis, a diminuição de momentos de inércia, o alívio dos sistemas de acionamento e a melhoria da eficiência energética durante operações de usinagem.¹ Além disso, devido às propriedades de amortecimento superiores desses materiais, são alcançadas maiores taxas de amortecimento estrutural. A estabilidade

térmica das máquinas também é beneficiada pelos baixos coeficientes de expansão térmica das peças de PRFC.²

Propriedades de amortecimento superiores referem-se à capacidade de um material dissipar energia vibracional. Em outras palavras, quando sujeito a forças externas ou vibrações, materiais com propriedades de amortecimento superiores conseguem absorver e dissipar essa energia de maneira eficaz. Isso é especialmente importante em aplicações industriais, como a construção de máquinas-ferramenta mencionada no texto. Materiais compostos, como os PRFC, muitas vezes exibem propriedades de amortecimento superiores em comparação com materiais tradicionais, contribuindo para a estabilidade e desempenho das máquinas durante operações de usinagem e outras atividades industriais.

A estrutura interna das peças feitas a partir de compósitos permite a criação de características mecânicas e térmicas quase isotrópicas ou anisotrópicas. Isotrópica significa que as propriedades do material são uniformes em todas as direções, enquanto anisotrópica indica que as propriedades variam de acordo com a direção. Métodos sofisticados de design são essenciais para explorar todo o potencial do material, como exemplificado por Lasova *et al.*³, para encontrar uma disposição ótima de um tubo quadrado envolto com PRFC, contendo fibras de alto módulo e camadas de amortecimento de composição de cortiça.³ Considerando a ampla gama de propriedades das fibras e os custos associados, estratégias abrangentes de otimização de design são cruciais. A análise de custo-benefício determina o preço viável para novos elementos compostos.

A integração funcional, como a incorporação de sistemas de sensores durante os processos de fabricação de peças compostas, e tecnologias de fabricação aditiva proporcionam melhorias além dos limites do design convencional de componentes.¹ Essas melhorias incluem a capacidade aprimorada de monitorar em tempo real o desempenho estrutural das peças compostas, detectar potenciais falhas precocemente e otimizar a manutenção. Além disso, a fabricação aditiva possibilita a criação de geometrias complexas e estruturas internas otimizadas, resultando em componentes mais leves e eficientes. A integração de sensores pode também contribuir para a coleta de dados em ambientes operacionais, permitindo ajustes dinâmicos e personalizados com base nas condições específicas de uso das peças compostas.

Metodologia

A análise metodológica do artigo de referência foi direcionada para estudos que exploraram diferentes aspectos do design, otimização e desempenho de estruturas híbridas, como o alumínio composto. Foram considerados os trabalhos de Möhring, H.-C.,¹ Kroll *et al.*,² Lasova *et al.*,³ e outros, de acordo com sua relevância para as aplicações específicas mencionadas no Quiartigo.

Resultados e discussão

Um objetivo fundamental ao utilizar materiais compósitos em máquinas de produção, naturalmente, é reduzir a massa e a inércia dos elementos móveis da máquina. Isso pode ser exemplificado em sistemas de robôs que pegam e colocam objetos, conforme mostrado na figura 2. Ao comparar máquinas similares que não fazem uso de materiais compósitos, torna-se evidente que as máquinas com componentes compostos conseguem alcançar uma considerável redução de massa. Essa redução não apenas contribui para uma operação mais eficiente, mas também resulta em vantagens significativas em termos de velocidade, aceleração e precisão.

Nessas aplicações específicas, como sistemas de robôs de manipulação, os requisitos funcionais em relação ao posicionamento e à precisão do caminho são relativamente baixos em comparação com as máquinas-ferramenta. No entanto, a redução de massa e inércia proporcionada pelos materiais compósitos pode ter um impacto significativo na eficiência energética, na vida útil dos componentes mecânicos e na capacidade de resposta do sistema. Esses benefícios tornam-se particularmente evidentes quando comparados com máquinas similares que empregam materiais convencionais, destacando assim a contribuição positiva dos materiais compósitos na otimização de máquinas de produção.

Figura 2. Robôs que pegam e colocam objetos da Convitech e da Kuka. Extraído de <https://www.addcomposites.com/>.



Por outro lado, dispositivos de metrologia e máquinas de inspeção exigem uma precisão muito alta, além da necessidade de uma rigidez dinâmica máxima e capacidade de amortecimento. As propriedades dinâmicas benéficas dos compósitos foram aproveitadas por Lee *et al.*⁴ no que diz respeito ao projeto de um braço guia de uma máquina de corte de fio por descarga elétrica. Utilizando o método dos elementos finitos, um design detalhado em relação ao comprimento de ligação e ao número de camadas de reforço foi conduzido. O método dos elementos finitos é uma técnica computacional que simula o comportamento de estruturas complexas dividindo-as em elementos discretos, permitindo uma análise precisa de suas propriedades físicas.

Comparado ao braço convencional, o peso foi reduzido para menos de 50%, a rigidez estática foi mantida e a frequência natural fundamental, assim como a taxa de amortecimento, foram significativamente melhoradas. Essa aplicação prática destaca não apenas a eficácia dos compósitos na redução de massa, mas também sua capacidade de melhorar propriedades dinâmicas essenciais para dispositivos de metrologia e máquinas de inspeção.

Essas melhorias não só aumentam a precisão das operações, mas também podem ter implicações significativas para a durabilidade a longo prazo, destacando como a utilização de materiais compósitos pode ser estratégica na

otimização de parâmetros físicos essenciais para aplicações específicas na área de metrologia e inspeção industrial.

Em relação ao design de máquinas-ferramenta para operações de corte e retificação, foram realizadas várias investigações e protótipos foram construídos para alcançar o melhor equilíbrio entre redução de massa, rigidez estática, frequências naturais fundamentais, coeficientes de amortecimento e estabilidade térmica. Além de estruturas quase puras de compósitos, a maioria das abordagens considera abordagens híbridas nas quais diferentes materiais são combinados. Como exemplo, um cabeçote híbrido de aço e compósito para máquinas de retificação de alta precisão foi analisado por Chang *et al.*⁵ e observou-se que especialmente na faixa de frequência mais elevada, de 100 a 500 Hz, o reforço do compósito resultou em uma melhoria na rigidez dinâmica e no amortecimento.⁵

Um ponto crucial mencionado por Kolesnikov *et al.*⁷ na utilização de compósitos é a influência que as juntas mecânicas têm nas suas estruturas, portanto deve-se ter um cuidado com o design para evitar danos estruturais nos compósitos, principalmente quando se combinam materiais com diferentes coeficientes de expansão térmica. Coeficiente de expansão térmica é uma propriedade termodinâmica que fornece uma medida da variação da densidade em resposta à variação da temperatura, mantendo a pressão constante.⁷ Dessa forma, quando materiais com diferentes coeficientes de expansão térmica são combinados, surgem desafios significativos devido às tensões mecânicas induzidas termicamente nas interfaces e articulações. Essas tensões podem resultar em problemas como descolamento e perda de rigidez estrutural. Para contornar esse problema, é possível a utilização de um reforço híbrido de materiais para aprimorar a resistência dessas juntas. Essa abordagem é crucial para garantir a integridade estrutural e o desempenho eficaz desses materiais compostos em aplicações práticas.⁶

Em relação às ferramentas, o uso de compósitos pode reduzir o momento de inércia dos rotores do fuso (eixo rotativo) e dos corpos das ferramentas, diminuir o crescimento térmico e aprimorar o comportamento dinâmico. Já existem demonstradores, bem como os primeiros produtos disponíveis, que podem ser vistos na figura 3.

Figura 3. Compósitos em ferramentas de corte e retificação metálica da Xperion. Extraído de <https://www.addcomposites.com/>.



Um outro exemplo de sucesso dos materiais compósitos é o eixo de alargador composto com interfaces específicas para os segmentos metálicos da ferramenta que o Heisel *et al.*⁸ desenvolveu que pode ser visto na figura 4. Comparando as massas da ferramenta de aço convencional e da ferramenta recém-projetada, teve uma redução de 28,5 kg para 10,5 kg, além de um aumento na rigidez e uma melhoria significativa na frequência natural fundamental.⁸

Em síntese, o êxito do eixo de alargador composto desenvolvido por Heisel *et al.*,⁸ evidenciado pela significativa redução de peso, aumento na rigidez e melhoria na frequência natural fundamental, ressalta a notável vantagem dos materiais compósitos na otimização de desempenho de ferramentas industriais, representando avanços substanciais na eficiência operacional e economia de recursos.

Figura 4. Construção modular de ferramenta de alargador composto. Extraído de <https://www.addcomposites.com/>.



Outro exemplo mais antigo, mas ainda assim notável, é o rotor compósito para fusos de máquinas-ferramenta, apresentado por Lee *et al.*⁹ em 1985. Em comparação com um sistema de rolamento de fuso de aço, observou-se um aumento de 20% na largura máxima de corte, e as características de pré-carregamento foram mais estáveis no sistema compósito.⁹

Além disso, materiais compósitos já foram usados para otimizar as propriedades magnéticas e mecânicas de componentes essenciais em motores elétricos, melhorando a eficiência e o desempenho geral do motor por meio do uso inovador de materiais avançados. O rotor de um motor de indução de corrente alternada foi fabricado por Chang *et al.*¹⁰ usando compósito de epóxi contendo pó magnético, o eixo do motor foi feito de material compósito de fibras de carbono de alto módulo e epóxi e um núcleo de aço foi inserido no rotor compósito para melhorar o fluxo magnético e otimizar a eficiência magnética do motor. Assim, o resultado foi uma solução mais leve em comparação com os motores convencionais, contribuindo para a redução de massa em sistemas onde a eficiência energética e o peso são considerações críticas.¹⁰

Em um cenário onde a busca por eficiência e desempenho é incessante, os materiais compósitos emergem como protagonistas ao possibilitar a redução de peso, aprimoramento de propriedades mecânicas e a eficiência energética em uma variedade de aplicações industriais. Os exemplos apresentados, desde máquinas-ferramenta até

ferramentas específicas como o eixo de alargador composto, ilustram de forma eloquente como a incorporação estratégica desses materiais pode catalisar avanços notáveis. Esses casos de sucesso destacam a capacidade dos compósitos não apenas de atender, mas de superar demandas funcionais, sinalizando um futuro promissor para a inovação e otimização de processos industriais.

Conclusões

A introdução generalizada de materiais compostos na indústria de máquinas e ferramentas reflete uma busca contínua pela redução de massa, impulsionada principalmente pelos setores aeroespacial e automotivo. O emprego de polímeros reforçados com fibras de carbono e outros materiais compósitos demonstra uma transição significativa na concepção estrutural, proporcionando benefícios como construção leve, menor inércia e eficiência energética aprimorada.

As implicações dessas mudanças vão além da simples redução de massa, as propriedades mecânicas e térmicas superiores dos compósitos permitem um design mais sofisticado, além de que a integração funcional, juntamente com avanços na fabricação aditiva, abre novos horizontes no design de componentes, fornecendo oportunidades além dos limites convencionais. No entanto, questões como custos materiais e a necessidade de processos de fabricação automatizados e reproduutíveis para peças de precisão continuam a ser desafios a serem superados.

A aplicação bem-sucedida dos compósitos se estende a diversas áreas, desde sistemas robóticos até máquinas de precisão, exemplificado pelos casos de estudo mencionados. A consideração cuidadosa de fatores como rigidez, amortecimento e estabilidade térmica é vital, especialmente em máquinas de alta precisão.

Em resumo, a revolução dos materiais compósitos na indústria de máquinas e ferramentas é sobre a redefinição dos limites do design estrutural, introduzindo novos parâmetros e desafios que moldarão a próxima geração de tecnologias na fabricação e automação.

Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de algumas observações são de Pedro P. Marques.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Agradeço ao PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) por todo o apoio concedido através do Programa de Educação Tutorial. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e referências

- 1 H.-C. Möhring, Composites in production machines, *1st Cirp Conference on Composite Materials Parts Manufacturing*, 2017, **4**, 2-9.
- 2 L. Kroll, P. Blau, M. Wabner, U. Frieß, J. Eulitz, M. Klärner, Lightweight components for energy-efficient machine tools, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2011, **4**, 148-160.
- 3 V. Lasova, J. Vacik, R. Kottner, Investigation of Dynamic Properties of Hybrid Laminate Structure, *Procedia Engineering*, 2012, **48**, 358-366.
- 4 S. Lee, H. Oh, G. Lee, H. Choi, A composite cantilever arm for guiding a moving wire in an electrical discharge wire cutting machine, *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, **113**, 172-177.
- 5 H. Chang, J. Kim, G. Lee, K. Choi, Steel-composite hybrid headstock for high-precision grinding machines, *Composite Structures*, 2001, **53**, 1-8.
- 6 B. Kolesnikov, L. Herbeck, A. Fink, CFRP/titanium hybrid material for improving composite bolted joints, *Composite Structures*, 2001, **83**, 368-380.
- 7 C. Canciam, Predição do coeficiente de expansão térmica do óleo de girassol através da aplicação da análise de regressão linear, *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*, 2012, **6**, 1-12.
- 8 U. Heisel, S. Schetter, Entwicklung eines Reibwerkzeugs in Leichtbauweise, *wt Werkstattstechnik online*, 2012, 102, 56-61.
- 9 G. Lee, C. Sin, P. Suh, Manufacturing of a Graphite Epoxy Composite Spindle for a Machine Tool, *Annals of the CIRP*, 1985, **34**, 365-369.

- 10 H. Chang, G. Lee, Performance of high speed air spindle motor equipped with composite squirrel cage rotor, *Composite Structures*, 2002, **55**, 419-427.
- 11 P. Luthada, Understanding Composites in Production Machines, <https://www.addcomposites.com/post/understanding-composites-in-production-machines>, (accessed January 24, 2024).