

APLICAÇÕES DA SIMULAÇÃO NA MICROUSINAGEM: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tânia Dálete Pires Maia, UFCAT, tania.maia@discente.ufcat.edu.br
Laura Teodora Miotto Reis, UFCAT, laura.miotto@discente.ufcat.edu.br
Aline Gonçalves dos Santos, UFCAT, aline_santos@ufcat.edu.br
André Alves de Resende, UFCAT, aaresende@ufcat.edu.br
Stella Jacyszyn Bachega, UFCAT, stella@ufcat.edu.br

Resumo: *A microusinagem tem ganhado importância crescente devido à demanda por componentes em escala micrométrica, especialmente em áreas como a biomedicina, que requerem peças de alta qualidade e com tolerâncias estreitas. Contudo, o estudo desse processo é complexo devido às suas pequenas dimensões. Nesse cenário, a simulação emerge como uma ferramenta importante, permitindo a modelagem e análise detalhada dos processos micrométricos sem a necessidade de experimentação física. Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre a aplicação da simulação na microusinagem, identificando as principais variáveis analisadas e softwares empregados. Para atingir esse objetivo, inicialmente, o tema foi delimitado para identificar lacunas na área de pesquisa, e foram determinados os termos de busca: "microusinagem" e "simulação". As fontes de dados consultadas foram as indexadas no SCOPUS. Na segunda fase, foi estabelecido o método de seleção dos artigos, começando com uma triagem dos resumos e, posteriormente, uma leitura completa dos artigos para seleção final. Também, foi conduzida uma análise bibliométrica das publicações que tratam do uso de simulação na microusinagem. As informações extraídas dos estudos incluíram os materiais investigados, os parâmetros utilizados e as variáveis controladas. Na fase final, a revisão foi escrita e as conclusões foram formuladas. Os resultados mostram que a simulação é uma ferramenta importante na microusinagem, oferecendo uma visão aprofundada dos processos e permitindo a otimização de diversos parâmetros. No entanto, para superar os desafios identificados, é necessário continuar o desenvolvimento de métodos de simulação mais precisos e eficientes, além de melhorar a validação dos modelos com dados experimentais*

Palavras-chave: *microusinagem, simulação, cavaco.*

1. INTRODUÇÃO

A micromanufatura refere-se à fabricação de micropeças ou produtos, ou à criação de microestruturas em superfícies ou componentes maiores, utilizando processos de manufatura em escala reduzida (Jain et al., 2014). A alta precisão é necessária para a produção desses produtos miniaturizados (Aramcharoen et al., 2008). Dentre os processos de micromanufatura, destaca-se a microusinagem que é empregada para produzir componentes miniaturizados e microestruturas, além de melhorar a qualidade de peças metálicas fabricadas aditivamente (Rahman et al., 2007; Hung e Corliss, 2019). O seu desenvolvimento tecnológico impulsiona a necessidade de produtos micro e miniaturizados nos setores automotivo, aeroespacial, eletrônico, de implantes médicos, biomédico e de robótica (Kumar et al., 2014).

Por outro lado, os desafios da micromanufatura incluem limitações quanto à geometria dos componentes, seleção de materiais e adequação para a produção em massa (Attia et al., 2014). Além disso, Mittal et al. (2018) destacam problemas como a baixa rigidez flexional das microferramentas, as altas velocidades de rotação, as temperaturas elevadas e o atrito na interface ferramenta-cavaco.

Neste contexto, a simulação computacional desempenha um papel importante na análise e no aprimoramento dos processos de microusinagem, fornecendo informações valiosas para a sua otimização (Volgin et al., 2016). A integração de modelos analíticos e de elementos finitos permite uma aproximação mais precisa das forças de usinagem, aumentando a eficiência da microusinagem (Ba et al., 2013). Além disso, a análise por elementos finitos (FEM) pode ser utilizada para investigar como as condições de corte e a geometria da ferramenta influenciam o processo, levando a novos aprimoramentos (Markopoulos et al., 2015).

As simulações também ajudam a prever a formação de cavacos, sua progressão e os mecanismos de distorção do material, contribuindo para uma compreensão mais profunda dos processos subjacentes e permitindo um controle mais preciso (Siregar et al., 2019). Estudos experimentais demonstraram que modelos de desgaste de ferramentas, baseados na geometria da ferramenta desgastada, podem prever com precisão as taxas de desgaste durante o microtorneamento. Por exemplo, no estudo de Elias et al. (2020), o modelo apresentou uma precisão de previsão com erro percentual inferior a 15%. Segundo Ba et al. (2013), a integração de modelos analíticos e de elementos finitos na microusinagem melhora a precisão das previsões de forças de usinagem, garantindo a exatidão geométrica e prevenindo a quebra da ferramenta.

Neste contexto, o objetivo geral deste artigo é oferecer uma revisão abrangente da literatura disponível sobre a aplicação da simulação na microusinagem. Pretende-se destacar as principais variáveis analisadas nos trabalhos científicos, os materiais investigados e os desafios enfrentados na utilização de técnicas de simulação para aprimorar o processo de microusinagem. A partir de uma análise detalhada de artigos selecionados, o estudo buscará identificar os avanços mais significativos, apontar as lacunas existentes no conhecimento sobre o tema e, por fim, sugerir direções para pesquisas futuras na área.

2. METODOLOGIA DE PESQUISA

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado o método de revisão descrito por Snyder (2019). Nesse método, quatro fases devem ser realizadas para a elaboração de artigos de revisão, a saber: (1) planejamento da revisão, (2) condução da revisão, (3) análise e (4) redação da revisão.

Para tanto, na etapa 1, primeiramente, definiu-se o objetivo da revisão, identificando lacunas na literatura e a necessidade de desenvolver o estudo. Após essa definição, foram identificados os termos de busca, que foram: *Simulation* e *Micromachining*. Quanto à base de dados, foi utilizada a SCOPUS, selecionando os principais editores da área, a saber: *American Society of Mechanical Engineers* (ASME), *Elsevier*, MDPI, *Springer* e *Taylor and Francis Ltd.*. Como critério de inclusão e exclusão, definiu-se selecionar artigos em inglês, publicados em periódicos científicos. Artigos de conferências foram excluídos. Dada a importância de utilizar definições consolidadas por autores ao longo dos anos, decidiu-se não restringir o ano de publicação dos trabalhos. Assim, na primeira etapa, foram identificados 390 artigos.

Após a identificação inicial dos artigos, procedeu-se à leitura de seus resumos e foi realizada uma seleção preliminar. Em seguida, os trabalhos foram lidos integralmente e selecionados. Dessa forma, 86 artigos foram escolhidos para a revisão. Com a definição da amostra de artigos, optou-se pela forma de extrair as informações mais relevantes para atender ao objetivo proposto. Assim, decidiu-se observar, principalmente, os efeitos e descobertas relatados nos trabalhos. Diante disso, a revisão foi conduzida.

O fluxograma das etapas da metodologia pode ser visualizado na Figura 1.

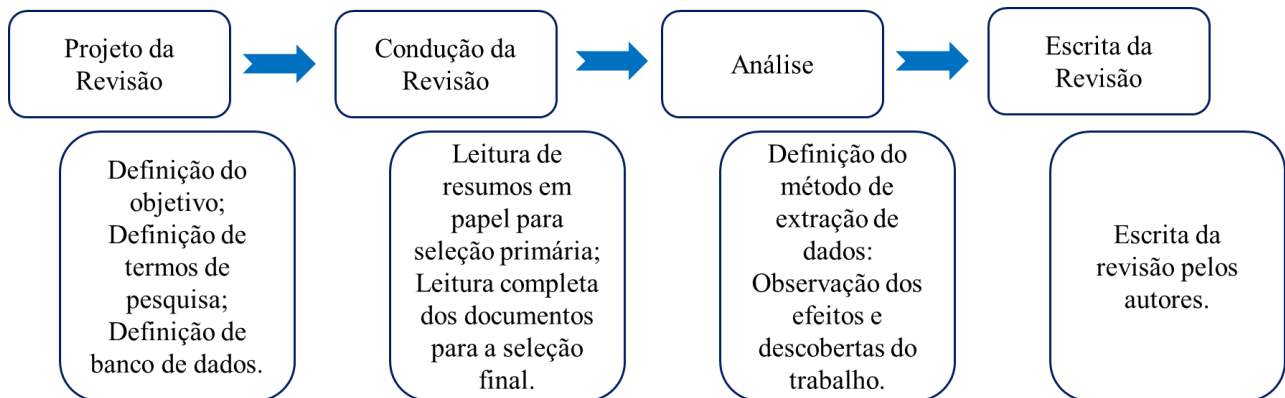


Figura 1: Fluxograma das etapas da metodologia (Fonte: Dados da pesquisa)

3. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA SOBRE SIMULAÇÃO EM MICROUSINAGEM

O estudo da simulação em microusinagem ainda é pouco explorado, como pode ser observado na Figura 2, em que se nota um número reduzido de publicações ao longo dos anos, totalizando 86 trabalhos. Vale destacar que, para esta análise, foram considerados apenas artigos de periódicos científicos indexados na base SCOPUS. A primeira publicação identificada data de 1999, sendo que os anos com maior número de publicações foram 2017 e 2021. Não se observa, entretanto, uma tendência clara ao longo do período analisado.

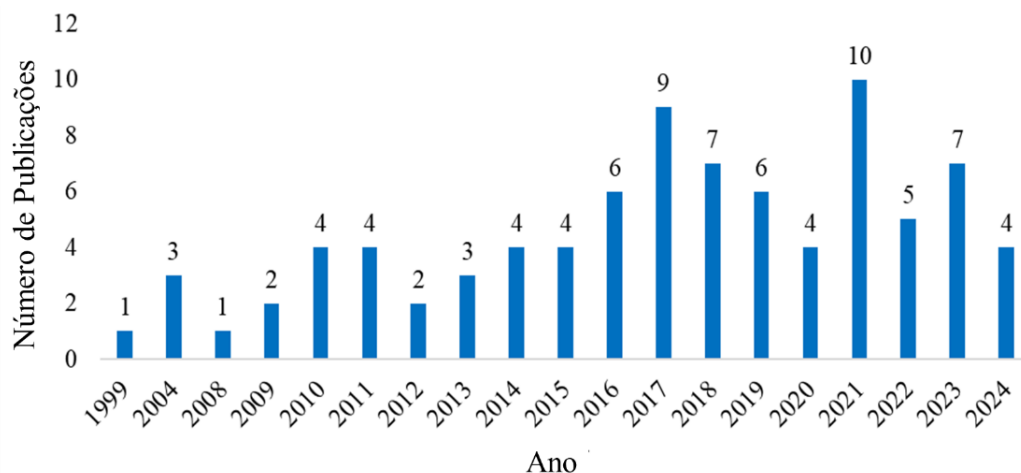


Figura 2: Número de publicações sobre simulação na microusinagem (Fonte: Dados da pesquisa)

Em relação à análise dos principais editores que apresentaram artigos sobre o tema, verifica-se que a Springer, seguida pela Elsevier, foram as que mais publicaram trabalhos na área, correspondendo a aproximadamente 80% do total. Essa quantidade limitada de trabalhos publicados ao longo dos anos evidencia uma lacuna na literatura que necessita de maior investigação.

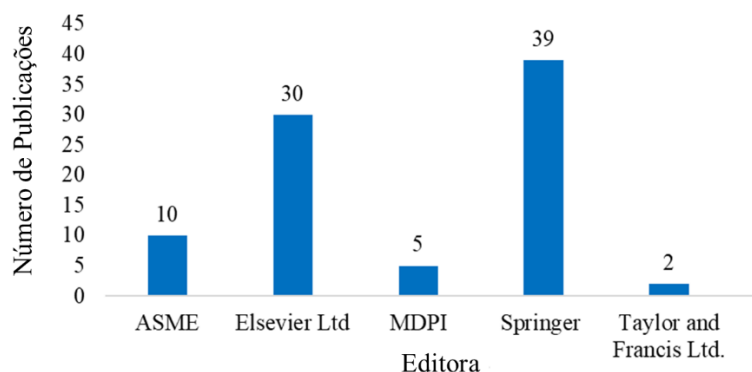


Figura 3: Número de publicações sobre simulação na microusinagem por editora (Fonte: Dados da pesquisa)

4. REVISÃO DA LITERATURA

4.1 Microusinagem

Toshiro Taniguchi (1974) definiu a microusinagem como um conjunto de processos de usinagem que permitem a fabricação de peças em escala muito pequena, geralmente, na faixa de micrometros (μm) e submicrometros. Esse campo de fabricação, de acordo com o autor, é caracterizado pelo uso de ferramentas cujas arestas de corte possuem diâmetros entre 1 μm e 500 μm , possibilitando a produção de microcomponentes com alta precisão dimensional. No entanto, Dornfeld et al. (2006) observam que a fronteira entre micro e macro usinagem pode, por vezes, ser estabelecida em 500 μm .

Nesse sentido, para evitar ambiguidade, três critérios foram propostos para que processos subtrativos, especialmente os mecânicos, sejam classificados como métodos de micro usinagem:

1. Ferramenta e tamanho das características: utilizar ferramentas cujo diâmetro varia entre 1 μm e 500 μm , bem como produzir tamanhos de características também nessa faixa (Masuzawa, 2000).
2. Espessura do cavaco não deformada: manter a espessura de cavaco não deformada/cortada equivalente ao tamanho de grão do material da peça de trabalho (Wu et al., 2020).
3. Dimensão comparável ao raio da ferramenta: garantir que essa espessura do cavaco e o tamanho de grão da peça se encontrem na faixa de nanos a poucos micrômetros, tornando-os comparáveis ao raio de aresta da ferramenta (Wojciechowski, 2022).

A formação do cavaco na microusinagem segue princípios semelhantes aos da usinagem convencional, contudo, as dimensões reduzidas tornam a espessura do cavaco não deformada próxima do tamanho de grão do material e do raio de aresta da ferramenta. Esse fato intensifica a sensibilidade ao efeito escala e às características microestruturais (Wu et al., 2020; Masuzawa, 2000). Na formação de cavaco no microfresamento, de acordo com Chae et al. (2006), a ferramenta interage com o material em nível microscópico, evidenciando zonas de cisalhamento diminutas e ressaltando a importância de fatores como rigidez e vibração em escalas tão pequenas.

De acordo com Gao e Huang (2002), a microusinagem ganhou maior visibilidade no início do século XXI em função da crescente demanda por microcomponentes em setores como eletrônica, comunicações, óptica, aviônica, medicina e automóveis. Esses segmentos requerem peças de dimensões reduzidas e tolerâncias rigorosas, muitas vezes além das capacidades dos processos convencionais. Aplicações notáveis incluem a fabricação de dispositivos médicos (por exemplo, *stents* e microagulhas), de elementos eletrônicos (como microchips e sensores) e de dispositivos ópticos de precisão (lentes para sistemas de foco automático). Além disso, pesquisas recentes

destacam a relevância da microusinagem na produção de microcanais para dispositivos *lab-on-a-chip*, importantes em diagnósticos médicos e sistemas de entrega de medicamentos, bem como em sistemas de resfriamento e outras aplicações industriais (Karimi et al., 2024). Observa-se ainda o interesse da indústria aeroespacial, que necessita de peças leves e extremamente precisas para turbinas e sistemas de propulsão, e da indústria de moldes e matrizes na confecção de microestruturas em polímeros e metais (Chae et al., 2006). Na Figura 4, pode-se observar exemplos de componentes produzidos pelo processo de microusinagem.

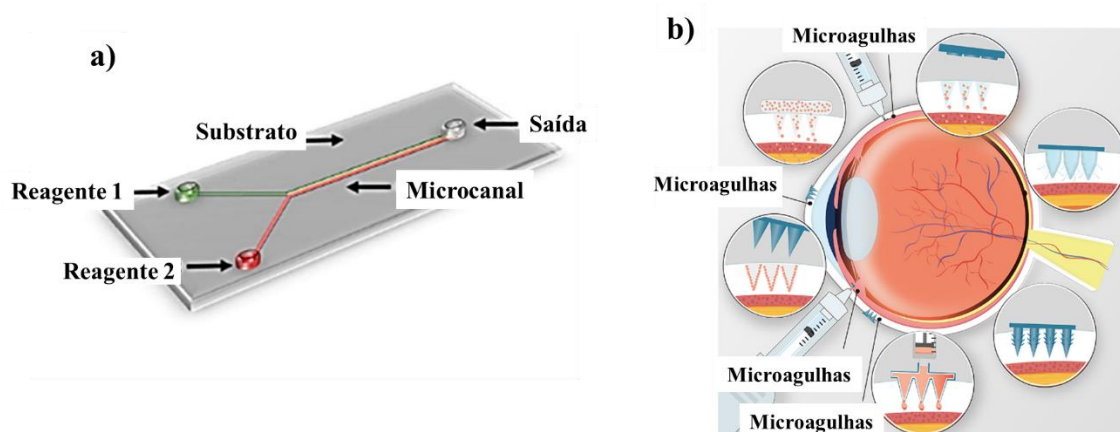


Figura 4: (a) Microcanal em dispositivo *lab-on-a-chip* em substrato flexível (Fonte: adaptado de Qamar; Shamsi, 2020); (b) Microagulhas utilizadas em sistemas de liberação de fármacos oculares (Fonte: adaptado de Glover et al., 2023)

Entretanto, embora a demanda por microcomponentes continue em expansão, a microusinagem enfrenta desafios significativos. Um dos principais é o custo inicial de aquisição de materiais e equipamentos especializados, além da complexidade operacional envolvida. De acordo com Balázs et al. (2022), mesmo com os avanços tecnológicos, os custos se mantêm elevados, dificultando a adoção mais ampla desses processos. Além disso, o desgaste acelerado das ferramentas, decorrente, tanto da alta precisão exigida, quanto da escala reduzida das peças, dificulta a remoção de material sem comprometer as extremidades trabalhadas.

Estudos de Kónya e Kovács (2023) ressaltam a importância de selecionar e otimizar cuidadosamente os parâmetros tecnológicos e as estratégias de fresamento, sobretudo, quando se trabalha com materiais de difícil usinagem. Outra dificuldade considerável ocorre na produção em larga escala de componentes por micro usinagem. Esse tipo de produção demanda cuidados adicionais em função das dimensões extremamente pequenas, afastando-se significativamente dos processos convencionais. Zang et al. (2021) discutem as dificuldades de se obter a precisão necessária para dispositivos microestruturados quando há variabilidade de materiais, sobretudo, no contexto de produção em massa, fator que impacta diretamente a qualidade e a uniformidade dos produtos finais.

A análise experimental do processo de micro usinagem também apresenta desafios particulares. São necessários instrumentos e sensores de alta precisão para a medição de esforços de corte e temperaturas em escala micro, bem como sistemas de captura de dados com elevada resolução temporal. Medidores de força em nível de micronewton, câmeras de alta velocidade para observar a formação do cavaco em tempo real e monitoramento avançado de vibração são exemplos de recursos essenciais (Chae et al., 2006). Da mesma forma, a preparação de amostras e a garantia de repetibilidade experimental exigem controle rigoroso de variáveis como a homogeneidade do material, a condição da ferramenta e a fixação adequada da peça (Wojciechowski, 2022). Esses requisitos elevam os custos e a complexidade da pesquisa na área. Em síntese, a micro usinagem

firmou-se como uma tecnologia de fabricação indispensável em diversos setores, principalmente na produção de peças de alta precisão e dimensões reduzidas. Apesar dos avanços e do interesse crescente, aspectos como custos iniciais, desgaste de ferramentas, complexidade operacional e análise experimental continuam demandando atenção, destacando a relevância do desenvolvimento de estudos com o uso de simulação para que todo o potencial dessa área seja plenamente explorado.

4.2 Aplicações da simulação na microusinagem

A simulação para investigar a microusinagem tem sido empregada para melhor compreensão dos fenômenos do processo. O microfresamento do aço ferramenta AISI H11 foi analisado por Platt et al. (2021) em um estudo híbrido que combinou simulação de remoção de material (*Material Removal Simulation* – MRS) e experimentos laboratoriais, com foco no efeito de geometrias wiper aplicadas em fresas micrométricas. Na MRS, o corpo-de-prova foi representado por um *heightfield* (grade de alturas) e a ferramenta por uma malha triangular que incluía a microgeometria do fio de corte em alta resolução. Os modelos de ferramenta, com diferentes comprimentos de aresta *wiper* (b_s), conforme pode ser observado na Fig. 5, foram construídos em software de modelagem 3D a partir de medições realizadas com microscopia eletrônica de varredura (SEM) e microscopia de variação de foco. A validação experimental foi conduzida em uma máquina CNC de precisão. As forças de corte foram medidas e a rugosidade superficial caracterizada pelos parâmetros como R_a , R_z , R_k , R_{pk} e R_{vk} . Os resultados mostraram alta concordância entre a MRS e os experimentos para a maior parte das condições, com desvios observados em *wipers* longos, atribuídos à ausência de modelagem de deflexões da ferramenta, atrito e deformações plásticas. De forma geral, a geometria *wiper* promoveu reduções expressivas de rugosidade superficial, atingindo até 84% de diminuição em R_a em comparação às ferramentas convencionais. Essa melhoria foi obtida principalmente com *wipers* curtos, que reduziram a rugosidade sem provocar aumentos relevantes nas forças de corte. Já *wipers* longos ($b_s > 80 \mu m$) mostraram tendência de elevar as forças de corte e as tensões residuais. Assim, o estudo evidenciou que a abordagem conjunta de simulação e experimentação não apenas permite pré-selecionar geometrias promissoras, mas também fornece explicações consistentes para os ganhos observados na prática, demonstrando o potencial das geometrias *wiper* para otimizar a integridade superficial e aumentar a produtividade na microusinagem do aço AISI H11.

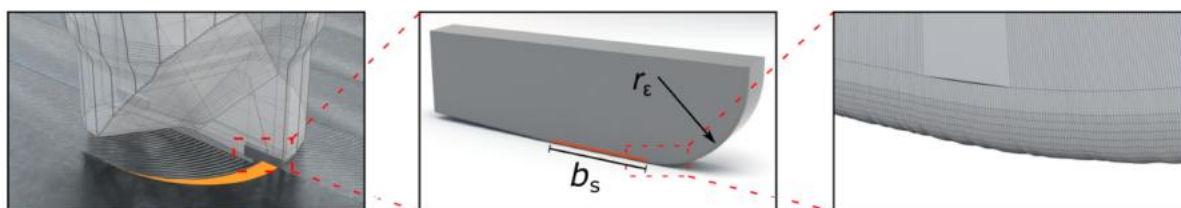


Figura 5: Modelagem do projeto da ferramenta e da aresta de corte para MRS (Fonte: Platt et al., 2021)

Dando continuidade à compreensão dos efeitos da microusinagem, especialmente no que se refere às variações geométricas da ferramenta, Abeni et al. (2019) investigaram o impacto do desbalanceamento (tool run-out) no processo aplicado ao latão CuZn37. Por meio de simulação por elementos finitos (FEM) aliada à validação experimental, buscou-se compreender o comportamento do material sob altas taxas de deformação, considerando também o desgaste da ferramenta e a formação de rebarbas. A metodologia incluiu simulações termo-mecânicas 3D realizadas no software Deform-3D, que foi usado para prever forças de corte, morfologia do cavaco e temperaturas geradas

durante a microusinagem. O modelo utilizou o material CuZn37 descrito pela lei constitutiva de Johnson-Cook, enquanto a geometria da ferramenta foi baseada em fresas de topo da SECO *Tools* (103L008R005-MEGA-64-T), feitas de carboneto de tungstênio com revestimento (Ti, Al)N. A ferramenta foi modelada com uma única aresta de corte para reduzir a complexidade da malha, que continha cerca de 210.000 elementos tetraédricos, com densidade maior na zona de contato entre ferramenta e peça (Abeni et al., 2019), conforme pode ser observado na Fig. 6. Os testes experimentais foram realizados em uma máquina CNC ultra-precisa de cinco eixos, Kern Pyramid Nano, com resolução de $\pm 0,3 \mu\text{m}$. As medições de força foram feitas com um sensor piezoelétrico de três componentes (Kistler 9317C), enquanto as amostras de cavacos foram analisadas usando um microscópio eletrônico de varredura (MEV). As velocidades de corte variaram entre 50 e 75 m/min, com avanço de $10 \mu\text{m}/\text{dente}$, e a espessura de corte axial foi ajustada entre $139 \mu\text{m}$ e $150 \mu\text{m}$. O desbalanceamento da ferramenta foi incorporado nas simulações para analisar seus efeitos nas forças de corte e na formação do cavaco (Abeni et al., 2019). Os resultados indicaram que o desbalanceamento da ferramenta tem um impacto significativo nas forças de corte e na qualidade da superfície gerada, sendo possível prever essas variáveis com boa precisão utilizando o modelo FEM. As simulações também demonstraram que a presença do desbalanceamento altera os tempos de engajamento das arestas da ferramenta, resultando em assimetria nas forças e na morfologia dos cavacos. Comparações entre os resultados simulados e os experimentais mostraram concordância razoável, especialmente para forças de corte em configurações de baixa velocidade. No entanto, as previsões em altas velocidades subestimaram as tensões reais do material devido às limitações do modelo Johnson-Cook (Abeni et al., 2019).

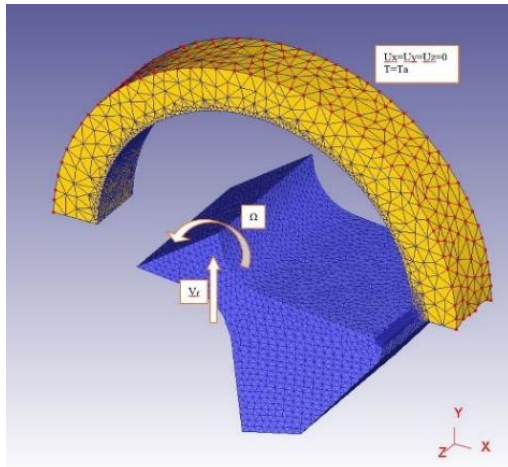


Figura 6: Simulação 3D considerando o efeito de *tool run-out* (desbalanceamento da ferramenta)
(Fonte: Abeni et al., 2019)

Avançando no estudo de materiais de difícil usinabilidade, outra pesquisa utilizou a simulação FEM para investigar a microusinagem do Inconel 718, uma superliga amplamente empregada em aplicações aeroespaciais e industriais. O foco esteve na análise da espessura mínima do cavaco não deformado (MUCT - *Minimum Undeformed Chip Thickness*) e na sua influência sobre a formação de cavacos e as forças de corte (Wang et al., 2017). O modelo tridimensional da ferramenta e da peça foi desenvolvido no software CAD Solid Edge. A ferramenta utilizada possui duas arestas, diâmetro de $500 \mu\text{m}$ e raio de aresta de corte de $5 \mu\text{m}$. A peça de trabalho apresentava dimensões de $400 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ e foi malhada com maior densidade nas regiões de contato com a ferramenta (Fig. 7). As propriedades dos materiais foram selecionadas diretamente da biblioteca do Deform-3D, sendo

a ferramenta feita de carboneto cimentado e a peça de Inconel 718 (Wang et al., 2017). Foram simuladas diferentes condições de avanço por dente (f_z) para determinar o MUCT, com valores variando entre 0,5 $\mu\text{m/z}$ e 4,0 $\mu\text{m/z}$. Os resultados mostraram que o avanço crítico para a formação de cavacos contínuos é de $f_z = 1,5 \mu\text{m/z}$. Além disso, foi analisado o efeito da profundidade de corte radial (a_e) sobre as forças de corte e a formação de cavacos, variando entre 50 μm e 200 μm . Observou-se que o aumento do a_e intensifica as forças de corte devido ao crescimento da espessura do cavaco não deformado (h) (Wang et al., 2017).

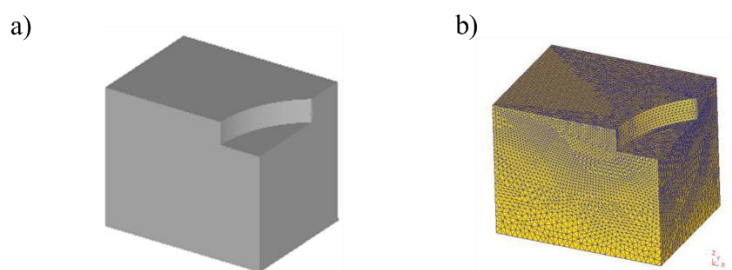


Figura 7: (a) Modelo CAD da peça e da ferramenta para microusinagem; (b) Malha FEM aplicada na simulação do processo de microusinagem (Fonte: Wang et al., 2017)

Esse mesmo enfoque sobre a espessura crítica do cavaco foi empregado na análise da microusinagem do Al7075-T6, outra liga metálica de interesse estratégico, especialmente na indústria aeroespacial. Utilizando também o software Deform-3D, buscou-se compreender a relação entre os parâmetros de usinagem e a formação de cavacos, bem como o impacto nas forças de corte (Sun et al., 2017). A ferramenta utilizada possuía diâmetro de 500 μm e raio de aresta de corte de 5 μm , feita de carboneto de tungstênio. A peça de trabalho investigada foi o Al7075-T6 com dimensões de 400 $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$. A simulação incluiu uma malha tetraédrica refinada nas bordas e na superfície da peça para melhorar a precisão dos resultados (Fig. 8a).

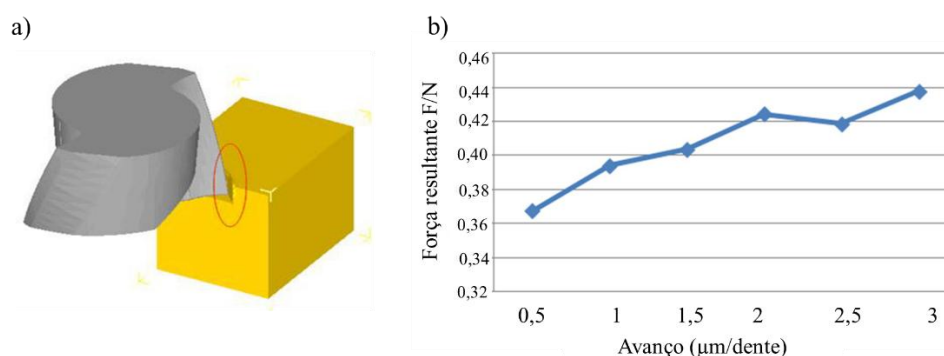


Figura 8: (a) Formação de cavacos em diferentes avanços por dente (f_z); (b) Variação da força de corte em função dos parâmetros de microusinagem (Fonte: Sun et al., 2017)

O avanço por dente (f_z) foi variado entre 0,5 $\mu\text{m/z}$ e 3,0 $\mu\text{m/z}$, e a profundidade de corte axial (a_p) foi mantida constante em 50 μm , enquanto a profundidade de corte radial (a_e) foi fixada em 100 μm durante parte dos experimentos (Sun et al., 2017). Os resultados indicaram que a formação de cavacos contínuos ocorre quando o avanço por dente atinge $f_z = 2,0 \mu\text{m/z}$, estabelecendo o MUCT para o material Al7075-T6. Observou-se que, com o aumento do f_z , a força de corte também aumenta

devido à maior espessura do cavaco (Fig. 8b). Simulações adicionais variando a_e (50 μm , 150 μm e 200 μm) demonstraram que forças de corte mais elevadas foram associadas a aumentos no a_e , devido ao aumento da espessura do cavaco não deformado (h) (Sun et al., 2017).

Com o objetivo de refinar as previsões de forças de corte em materiais de alta complexidade, como o IN625, outra abordagem propôs a calibração de leis de tensão de escoamento com o uso de algoritmos de otimização. Por meio de simulações bidimensionais FEM, conforme pode ser observado na Fig. 9, e utilizando o algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO), foi possível otimizar os parâmetros da equação de Johnson-Cook modificada para representar com maior precisão o comportamento do material fabricado por manufatura aditiva (Abeni et al., 2023). Dando sequência à análise das estratégias de simulação aplicadas à microusinagem, a metodologia anterior foi complementada com a utilização de um modelo bidimensional no software Deform2D®, empregando uma malha dinâmica refinada com elementos quadrangulares para representar tanto a ferramenta quanto a peça de trabalho, conforme pode ser observado na Fig. x. A peça foi fabricada por manufatura aditiva (LaserCUSING™), utilizando pó de IN625, com composição química predominante de Ni (61,6%), Cr (22%) e Mo (9%). A geometria consistia em paredes finas de 0,2 mm e a ferramenta, com duas arestas de corte, apresentava diâmetro efetivo de 789 μm , raio de 4 μm e revestimento de AlTiN. As forças de corte foram simuladas sob condições variáveis de avanço por dente (f_z) entre 2,5 $\mu\text{m/tooth}$ e 10 $\mu\text{m/tooth}$, e velocidade de corte (v_c) entre 30 m/min e 40 m/min, mantendo a profundidade de corte axial constante em 0,2 mm (Abeni et al., 2023). O modelo incorporou propriedades térmicas e mecânicas dependentes da temperatura, e o coeficiente de atrito na interface ferramenta-cavaco foi fixado em 0,6, considerando ainda os efeitos de condução e convecção térmica no sistema. A calibração dos parâmetros da equação de Johnson-Cook modificada (AA, BB e n) foi realizada com base em dados experimentais e modelo analítico previamente validado, utilizando o algoritmo PSO. Os resultados obtidos mostraram erros percentuais baixos (entre 3,8% e 14,8%) nas previsões das forças de corte, demonstrando a eficácia da estratégia em prever o comportamento da microusinagem de superligas difíceis de usinar como o IN625 (Abeni et al., 2023).

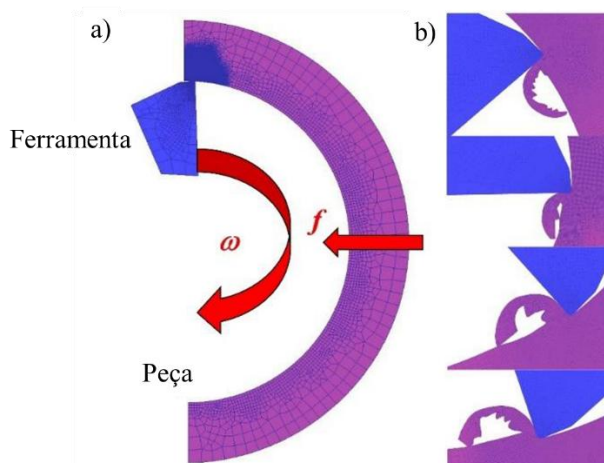


Figura 9: Integração FEM 2D com *Particle Swarm Optimization* para o material IN625 (Fonte: Abeni et al., 2023)

A busca por maior fidelidade na previsão das características de superfícies microusinadas levou à incorporação de métodos computacionais mais abrangentes, os quais integram modelos físicos e dados experimentais. A análise enfatizou o papel de variáveis como deformações plásticas, vibrações

da ferramenta, desalinhamento do eixo (*run-out*) e propriedades anisotrópicas dos materiais sobre a topografia final da superfície. Modelos *multiphysics* e técnicas de aprendizado de máquina também foram empregados para prever características como rugosidade e ondulação, com base em dados adquiridos por sensores de máquina e medições ópticas de alta resolução (Tosello et al., 2023). A integração desses modelos com dados experimentais visa o desenvolvimento de gêmeos digitais (*digital twins*), capazes de simular em tempo real o processo de fabricação, permitindo ajustes automáticos e redução de custos operacionais. Tosello et al., (2023) destacam, contudo, os desafios ainda existentes, como a modelagem precisa de materiais complexos, a necessidade de maior acurácia nos modelos de interação ferramenta-peça e a integração efetiva com sistemas de inteligência artificial.

Complementando os estudos baseados em simulações físico-matemáticas, modelos geométricos também têm sido empregados para compreender o comportamento do cavaco durante o microfresamento. Em uma simulação desenvolvida em MATLAB, utilizando uma fresa de topo com 200 μm de diâmetro e duas arestas de corte (raio de 2 μm), foi avaliado o impacto da espessura mínima de cavaco sobre a taxa de produção de cavacos. Foram consideradas trajetórias trocoidais com velocidades de rotação de 80.000 rpm, avanço por dente entre 1,0 mm/s e 2,0 mm/s, e profundidade de corte axial de 0,04 mm. O algoritmo simulou a variação da espessura de corte durante a rotação da ferramenta e correlacionou esse valor à quantidade de cavacos formados (Lee; Sodemann, 2018). Os resultados mostraram que, quando a espessura não cortada é inferior ao MCT, o material não é removido eficientemente, predominando o regime de deformação elasto-plástica (*ploughing*) em vez do corte efetivo. Nessas condições, observou-se redução de até 50% na taxa de cavaco produzido, enquanto o aumento do avanço gerou crescimento de até 200% no volume de material removido. Esses achados indicam que o comportamento da taxa de produção de cavacos pode ser utilizado como parâmetro de monitoramento da interface ferramenta-peça, embora a ausência de efeitos dinâmicos como deflexão e vibração da ferramenta represente uma limitação do modelo (Lee; Sodemann, 2018).

Para investigar a microusinagem em níveis ainda mais fundamentais, foi adotada a abordagem de dinâmica molecular (MD), permitindo observar o comportamento atômico dos materiais durante o corte. Em simulações com ferramentas rígidas de diamante com raios de 2 a 10 nm e materiais como cobre e alumínio, foram analisadas variáveis como espessura mínima de cavaco, rugosidade e profundidade da camada deformada. As espessuras de corte variaram entre 0,1 nm e 1,2 nm, e as velocidades de corte atingiram até 200 m/s. A modelagem utilizou o potencial de Morse para simular as interações atômicas, permitindo acompanhar os deslocamentos e a formação dos cavacos em escala nanométrica (Shimada et al., 1993). Os resultados indicaram que a MTC está diretamente relacionada ao raio da aresta de corte e às propriedades do material. Para o cobre, observou-se um valor de 0,3 a 0,6 nm, correspondente a cerca de 1/10 a 1/20 do raio da ferramenta. Já no alumínio, devido à maior plasticidade, a espessura mínima foi superior, e a rugosidade superficial mais acentuada. A profundidade da camada deformada variou entre 5,0 nm (para o cobre) e 9,7 nm (para o alumínio), confirmando que a interação entre ferramenta e material influencia diretamente a qualidade superficial obtida (Shimada et al., 1993).

Tendo em vista que a precisão dimensional na microusinagem é de grande relevância, estudos são conduzidos para melhorar essa característica nas peças produzidas. Li et al. (2022) desenvolveram um modelo dinâmico abrangente para tentar reduzir os erros dimensionais de paredes finas micro fresadas com base em um dispositivo de compensação de parâmetros de corte em processo. Os resultados obtidos por meio da simulação proporcionaram uma redução dos erros relativos médios de 6.86% até 1.10%~1.70%.

Considerando a dificuldade de medir a temperatura no processo de usinagem em escala micro e sua relevância para compreender o desgaste de ferramenta, Santos et al. (2023) investigaram, por

meio de simulação numérica utilizando um método de elementos finitos tridimensional (3D) e o software comercial *Third Wave AdvantEdge™*, e ensaios experimentais. Conforme pode ser observado na Fig. 10, a temperatura máxima encontrada na simulação, no microfresamento de uma liga de titânio (Ti-6Al-4V), foi de ~ 72 °C. Durante os ensaios experimentais, a temperatura máxima foi de ~ 69 °C. Assim, nota-se que os valores encontrados foram próximos. Os autores verificaram também que os valores apresentados nos ensaios experimentais e na simulação são menores quando comparados com a usinagem convencional.

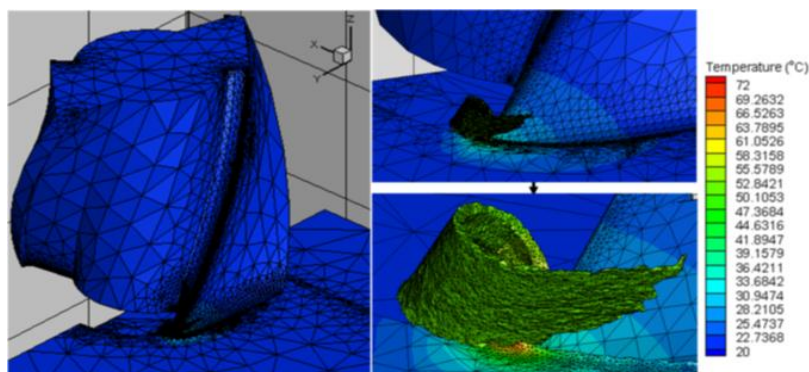


Figura 10: Formação de cavaco no processo de microusinagem (Fonte: Santos et al., 2023)

Destaca-se que a formação de cavaco no processo de microusinagem ainda foi pouca explorada. Descobertas recentes foram feitas e um novo formato foi identificado, o cavaco esferoidal. Diante das pequenas dimensões do cavaco e a incapacidade de acessar a zona de corte, Oliveira et al. (2021) realizaram análises de simulação computacional para ampliar a compreensão dessa descoberta. Para tanto, investigaram o microfresamento do Inconel 718. Os autores identificaram 3 tipos de cavacos: helicoidal, fita e esferoidal, conforme pode ser observado na Fig. 11.

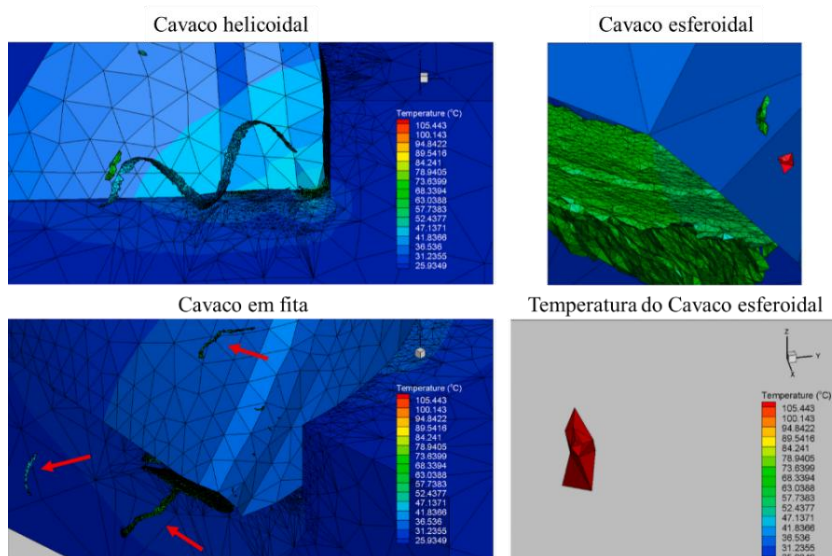


Figura 11: Tipos de cavacos formados na simulação do microfresamento do Inconel 718 (Fonte: Oliveira et al., 2021)

Com os resultados computacionais, foi possível verificar que o cavaco helicoidal é formado pelo corte que ocorre corretamente na aresta de corte principal e os cavacos de fita (ou arco) podem ser atribuídos à aresta de corte menor. A presença de cavaco esferoidal está associada a uma alta energia específica e pode indicar que o processo precisa de melhorias, tanto nos parâmetros de corte, quanto na geometria da microferramenta.

A modelagem das forças de corte em microfresamento é desafiadora devido ao efeito escala e à existência de uma espessura mínima de corte. Nesse sentido, Li e Wu (2016) desenvolveram um modelo de elemento finito (EF) para simular forças de corte bidimensionais em micro cortes ortogonais de latão, levando em consideração o efeito *ploughing* e aresta da ferramenta. Os resultados da simulação das forças de microfresamento são comparados com a medição experimental, onde uma concordância das tendências de força é mostrada junto com o aumento da taxa de avanço e da profundidade de corte.

Diante dos trabalhos analisados na literatura, algumas constatações importantes podem ser ressaltadas, conforme exposto na Tab. 1. Observa-se que a simulação na microusinagem permite avaliações que são complexas de serem realizadas de forma experimental. Dentre as variáveis analisadas, destacam-se a formação de cavacos, as forças de corte e a temperatura de usinagem. Informações importantes, como por exemplo, a compreensão da formação dos cavacos, sua correlação com a temperatura e a definição da espessura mínima de corte, devido às pequenas dimensões do processo, foi possível somente por meio da simulação, conforme exposto no trabalho de Oliveira et al. (2021).

Tabela 1: Exemplos de Estudos em Microusinagem com Simulação (Fonte: Dados da pesquisa).

Referência	Material	Método de Simulação	Principais Conclusões
Abeni et al. (2023)	IN625 (superliga de Ni)	FEM 2D + Particle Swarm Optimization	Ajuste da lei de fluxo de tensão (Johnson-Cook modificado) → boa correlação entre modelo e experimento.
Platt et al. (2021)	AISI H11 (aço ferramenta)	Software de modelagem 3D	A simulação demonstrou alto potencial com base na visualização do acabamento superficial alcançável.
Abeni et al. (2019)	CuZn37 (latão)	FEM 3D considerando <i>run-out</i> da ferramenta	<i>Run-out</i> impacta geometria do cavaco e forças de corte; simulação valida resultados experimentais.
Sun et al. (2017)	Al7075-T6 (liga de alumínio)	FEM 2D (chip formation e MUCT)	Força de corte cresce com profundidade radial; MUCT identificado em $f_z \approx 2 \mu\text{m/z}$.
Wang et al. (2017)	Inconel 718 (superliga difícil de cortar)	FEM (mecânica + variação de parâmetros de corte)	MUCT em $1.5 \mu\text{m/z}$; recomenda-se profundidade radial reduzida para minimizar forças de corte.
Tosello et al. (2023)	Superfícies diversas (micro/nano)	Modelagem multi-física + Digital Twin	Simulações avançadas permitem prever topografia 3D; integração com gêmeo digital é tendência futura.

Santos et al. (2023)	Liga Ti-6Al-4V	FEM 3D	Temperatura máxima na zona de corte foi ~ 72 °C, semelhante aos valores experimentais.
Oliveira et al. (2021)	Inconel 718	FEM 3D	Identificação de três tipos principais de cavacos na microusinagem do Inconel 718: helicoidal, fita e esferoidal.

Durante o estudo da literatura, também foi possível identificar as principais ferramentas utilizadas para simulação do processo de microusinagem, conforme pode ser observado na Tab. 2. Nota-se que a simulação por meio do método de elementos finitos 3D tem sido a mais empregada pelos autores. Esse fator se deve, principalmente, à possibilidade de analisar de forma detalhada a região de corte com elementos em escala que se adequam às dimensões do processo.

Tabela 2: Softwares Utilizados em Estudos de Microusinagem (Fonte: Dados da pesquisa).

Software/ Ferramenta	Tipo	Aplicação na Microusinagem
Deform-3D	FEM 3D	Simulação de forças de corte, formação de cavacos, MUCT e tensões térmicas.
ABAQUS	FEM 3D	Simulações termo-mecânicas; previsão de cavaco, temperatura e forças de corte.
Solid Edge	CAD	Modelagem geométrica de ferramenta e peça antes da simulação.
Particle Swarm Optimization + FEM 2D	Híbrido (otimização + FEM)	Ajuste da lei de fluxo de tensão (Johnson-Cook modificado).
Third Wave AdvantEdge™	FEM 3D	Medição de temperatura/ Formação de cavacos.

5. CONCLUSÃO

A microusinagem tem aplicação crescente, com tendências de miniaturização de componentes em diversas áreas. Entretanto, seu estudo é complexo, devido às limitações impostas pelas pequenas dimensões associadas ao processo. Diante deste contexto, a simulação tem sido utilizada para avaliação do processo, identificando seus fenômenos e possíveis melhorias.

Com o desenvolvimento do presente trabalho, pode-se constatar que a simulação permite estimar variáveis importantes para compreensão do processo de microusinagem, como a temperatura, formação de cavacos e determinação da espessura mínima de corte. Detalhes da zona de corte que são difíceis de serem analisados de maneira experimental têm sido exploradas, principalmente, com o uso da simulação pelo método de elementos finitos 3D.

Entretanto, ressalta-se que, apesar da simulação auxiliar o estudo da microusinagem, as análises ainda são incipientes, com poucos estudos desenvolvidos, identificando uma lacuna a ser explorada. Assim, como trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de estudos experimentais para aprofundar a compreensão da microusinagem e analisar diferentes variáveis.

Adicionalmente, destaca-se a necessidade de modelar explicitamente o *run-out* e sua interação com a espessura mínima de corte (MUCT), uma vez que pequenas excentricidades alteram a espessura instantânea de cavaco e afetam forças, rebarba e acabamento. Observou-se que o FEM 3D

termo-mecânico tende a oferecer melhor fidelidade quando a lei constitutiva e o atrito são coerentemente parametrizados com o experimento.

6. REFERÊNCIAS

- ABENI, S. et al. A novel 2D micromilling FEM simulation strategy to optimize the flow stress law of IN625. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 188, 104896, 2023.
- ABENI, S. et al. FEM simulation of micromilling of CuZn37 brass considering tool run-out. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 42, p. 35–44, 2019.
- ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P. T.; YANG, S.; COOKE, K. E.; TEER, D. G. Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 48, n. 14, p. 1578–1584, 2008. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2008.05.
- ATTIA, U.; MARSON, S.; ALCOCK, J. Design and fabrication of a three-dimensional microfluidic device for blood separation using micro-injection moulding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v. 228, p. 941–949, 2014. DOI: 10.1177/0954405413510153.
- BA, S.; JAIN, N.; JOSEPH, V.; SINGH, R. Integrating analytical models with finite-element models: an application in micromachining. *Journal of Quality Technology*, v. 45, p. 200–212, 2013. DOI: 10.1080/00224065.2013.11917926.
- BALÁZS, B. et al. Economic aspects of micromachining technologies. *Precision Engineering*, v. 72, p. 200–212, 2022.
- CHAE, J.; PARK, S. S.; FREIHEIT, T. Micro-cutting in micro-machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 46, n. 3–4, p. 313–332, 2006.
- ELIAS, J.; ASAMS, S.; MATHEW, J. Worn tool geometry-based flank wear prediction in micro turning. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v. 234, p. 710–719, 2020. DOI: 10.1177/0954405419889239.
- GAO, C.; HUANG, H. Micro machining technology: developments and applications. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 25, p. 185–199, 2017.
- HUNG, W.; CORLISS, M. Micromachining of advanced materials. *Micromachining*, 2019. DOI: 10.5772/intechopen.89432.
- JAIN, V.; SIDPARA, A.; BALASUBRAMANIAM, R.; LODHA, G.; DHAMGAYE, V.; SHUKLA, R. Micromanufacturing: a review — Part I. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v. 228, p. 973–994, 2014. DOI: 10.1177/0954405414539487.
- KARIMI, H. et al. Micromachining for lab-on-a-chip and biomedical applications: a comprehensive review. *Micromachines*, v. 15, n. 1, p. 45, 2024.
- KÓNYA, M.; KOVÁCS, Z. Optimization strategies in micro milling of difficult-to-cut materials. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 78, p. 123–132, 2023.
- KUMAR, S. P.; JERALD, J.; KUMANAN, S.; PRABAKARAN, R. A review on current research aspects in tool-based micromachining processes. *Materials and Manufacturing Processes*, v. 29, n. 11–12, p. 1291–1337, 2014. DOI: 10.1080/10426914.2014.952037.
- LEE, D.; SODEMANN, A. Geometrical simulation of chip production rate in micro-end milling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 140, n. 5, p. 051002-1–051002-11, 2018.
- LI, Y.; CHENG, X.; ZHENG, G.; YAN, J.; LIU, H.; LI, X. Dynamic modeling and in-process parametric compensation for fabricating micro straight thin walls by micromilling. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 18, p. 2480–2493, 2022.

- MARKOPOULOS, A.; HADJICOSTAS, C.; MANOLAKOS, D. Investigation of the effect of cutting conditions and tool edge radius on micromachining with the use of the finite elements method. *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering*, v. 2, p. 26–37, 2015. DOI: 10.4018/IJMFMP.2015010102.
- MASUZAWA, T. State of the art of micromachining. *CIRP Annals*, v. 49, n. 2, p. 473-488, 2000.
- MITTAL, R.; SINGH, R.; KULKARNI, S.; KUMAR, P.; BARSHILIA, H. Characterization of anti-abrasion and anti-friction coatings on micromachining response in high speed micromilling of Ti-6Al-4V. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.06.021.
- OLIVEIRA, D.; GOMES, M. C.; OLIVEIRA, G. V.; SANTOS, A. G.; SILVA, M. B. Experimental and computational contribution to chip geometry evaluation when micromilling Inconel 718. *Wear*, v. 476, 203658, 2021. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203658.
- PLATT, T.; MEIJER, A. L.; MERHOFE, T.; BIERMANN, D. Simulation-based and experimental investigation of micro end mills with wiper geometry. *Micromachines*, v. 12, n. 5, p. 505, 2021.
- RAHMAN, M.; LIM, H.; NEO, K.; KUMAR, A.; WONG, Y.; LI, X. Tool-based nanofinishing and micromachining. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 185, p. 2–16, 2007. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.03.121.
- SANTOS, A. G.; SILVA, M. B.; OLIVEIRA, G. V.; JACKSON, M. J. Workpiece temperature investigation in micromilling of titanium alloy. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 47, p. 193–204, 2023. DOI: 10.1016/j.cirpj.2023.10.003.
- SHIMADA, S. et al. Feasibility study on ultimate accuracy in microcutting using molecular dynamics simulation. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, v. 42, n. 1, p. 91–94, 1993.
- SIREGAR, I.; SAEDON, J.; ADENAN, M.; NOR, N.; PAZAI, N. Contact phenomena in micromachining: modelling and simulation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 505, 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/505/1/012093.
- SNYDER, H. Literature review as a research methodology: an overview and guidelines. *Journal of Business Research*, v. 104, p. 333–339, 2019. DOI: 10.1016/j.jbusres.2019.07.039.
- SUN, Y. et al. Micromilling simulation for the hard-to-cut material. *Procedia CIRP*, v. 62, p. 403–408, 2017.
- TOSELLO, G. et al. Modeling and simulation of surface generation in manufacturing. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, v. 72, n. 2, p. 655–678, 2023.
- TOSELLO, G.; BISSACCO, G.; CAO, J.; AXINTE, D. Modeling and simulation of surface generation in manufacturing. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, v. 72, n. 2, p. 753–779, 2023.
- WOJCIECHOWSKI, S. et al. Recent advances in micro-milling: review of cutting force modeling and monitoring. *Micromachines*, v. 13, n. 7, p. 1092, 2022.
- WU, Y. et al. Progress and challenges in micro-milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 155, p. 103553, 2020.
- ZANG, J. et al. Challenges in mass production of micro-structured components by micromachining. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 297, p. 117279, 2021.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.