

ESTUDO DA FORÇA DE USINAGEM NO TORNEAMENTO DE COMPÓSITOS AUTOLUBRIFICANTES SINTERIZADOS

Caroline Francisco Dorneles, carol.fdorneles@gmail.com

Felipe Gustavo Ebersbach, felipe.ebersbach@gmail.com

Rolf Bertrand Schroeter, rolf.schroeter@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Mecânica de Precisão. Caixa Postal 476, EMC – CEP 88010-970, Florianópolis/SC – Brasil.

Resumo. No contexto atual, a melhoria na eficiência energética em máquinas e equipamentos vem se tornando uma prioridade constante nos setores industriais, visando máquinas e equipamentos mais eficientes. Desta forma, os compósitos autolubrificantes sinterizados se apresentam como uma alternativa viável aos materiais já utilizados em engenharia, em decorrência de suas propriedades mecânicas satisfatórias e baixo coeficiente de atrito, que contribuem para a diminuição no consumo de energia e aumento da sustentabilidade. Logo, o presente trabalho apresenta uma análise das componentes de força de usinagem no torneamento longitudinal externo de um compósito autolubrificante sinterizado. Os corpos de prova foram fabricados pelo processo de metalurgia do pó e apresentam uma matriz metálica, composta por pó de ferro com adição de elementos de liga (Ni e Si), com adição de partículas de hBN e grafita como lubrificantes sólidos. Os ensaios foram realizados com velocidades de corte (v_c) de 350 m/min e 850 m/min. A profundidade de corte e o avanço foram fixados em 1,0 mm e 0,2 mm, respectivamente. Os ensaios de torneamento foram realizados com insertos de metal-duro, classe P20, de formato triangular com três gumes em uma única face, variando o raio do gume (5 μ m e 50 μ m) e o ângulo de saída (6° e 30°). Como resultados, foi possível observar que as componentes da força de usinagem foram influenciadas pela variação da velocidade de corte, ângulo de saída e raio do gume. Ademais, para todas as condições testadas, o aumento da velocidade de corte proporcionou uma diminuição nas componentes da força de usinagem.

Palavras-chave: compósito autolubrificante sinterizado; força de usinagem; geometria da ferramenta de corte; velocidade de corte.

1. INTRODUÇÃO

No cenário atual de sustentabilidade, a eficiência energética emergiu como um dos temas de pesquisa mais relevantes no meio industrial. Luo e Zhou (2020) indicam que aproximadamente 30% dos recursos energéticos ao redor do mundo são consumidos para vencer o atrito entre componentes mecânicos. Só no ano de 2018, as perdas devidas a esse fenômeno representaram entre 2 e 7% do PIB no mundo todo. Holmberg e Erdemir (2019) afirmam que aproximadamente 23% da energia produzida no mundo é utilizada para suprir contatos tribológicos deficientes, sendo 20% usada para superar o atrito e 3% para recuperação de peças desgastadas. Logo, pesquisas que englobem o desenvolvimento de novos materiais com propriedades otimizadas, ganham cada vez mais importância nesse cenário.

Segundo Gwidon e Stachowiak (2006), os compósitos autolubrificantes sinterizados se apresentam como uma boa solução para aplicações de alta pressão e temperatura, onde a lubrificação líquida não apresenta bom desempenho. Esses materiais são fabricados pelo processo de metalurgia do pó e apresentam duas fases quimicamente diferentes, sendo uma matriz metálica ferrosa, com adição de elementos de liga, e partículas de lubrificantes sólidos dispersos em seu volume. Erdemir (2000) explica que os lubrificantes sólidos são materiais com baixo coeficiente de atrito e baixa compressão molecular, capazes de criar camadas devido à facilidade em serem cisalhados, impedindo assim o contato entre superfícies em movimento relativo. Neste contexto, Hammes (2010) e Binder (2009) desenvolveram compósitos autolubrificantes de matriz metálica com elevada resistência mecânica e baixo coeficiente de atrito, por meio do processo de metalurgia do pó.

Com o objetivo de melhorar a qualidade da superfície dos compósitos autolubrificantes, o processo de usinagem é utilizado como processo de acabamento após a etapa de sinterização do material. Sendo assim, o processo de torneamento torna-se uma excelente alternativa devido a sua ampla aplicação na indústria e sua capacidade em atingir especificações dimensionais mais rigorosas. Portanto, os estudos focados na influência do processo de torneamento sobre o material são de extrema importância no desenvolvimento dos processos produtivos desses componentes.

A descontinuidade da matriz dos compósitos autolubrificantes, em combinação com suas propriedades mecânicas, apresentam influência durante a usinagem, interferindo na qualidade da superfície usinada. Os materiais sinterizados apresentam baixa condutividade térmica, em decorrência da alta porosidade inerente ao processo, o que resulta no aumento da temperatura na região de corte durante a usinagem (Salak *et al.*, 2006). De acordo com M'saoubi *et al.* (2014),

Nieslony e Kiszka (2012) e Grzesik (2016), a porosidade presente nos materiais sinterizados faz com que ocorra uma diminuição nas forças durante a usinagem, que influencia também na formação do cavaco durante o processo.

Ebersbach *et al.* (2020) avaliaram o efeito da variação da velocidade de corte no comportamento das componentes da força de usinagem no torneamento de compósitos autolubrificantes sinterizados. Os ensaios foram realizados variando a velocidade de corte ($v_c = 100$ e 200 m/min), avanço ($f = 0,1$ e $0,2$ mm), profundidade de corte ($a_p = 0,5$ e 1 mm), bem como a rota de fabricação dos materiais simples compactação (SP) e dupla compactação (DP). Independente da rota de fabricação, pode-se observar que o aumento na velocidade de corte resultou em uma redução nos valores da força de corte em cerca de 10%, para ambas as profundidades de corte e avanço testadas. Comportamento similar foi observado para a força passiva, apresentando uma redução de aproximadamente 25%.

Dorneles *et al.* (2023) analisaram a influência do aumento da velocidade de corte nas componentes da força de usinagem durante o torneamento longitudinal externo de compósitos autolubrificantes sinterizados. Os resultados demonstraram que o aumento da velocidade de corte, de 350 para 850 m/min, influenciou diretamente a componente da força de corte, apresentando uma diminuição de 9% com esse aumento. As componentes das forças passiva e de avanço não apresentaram diferença estatística, entretanto, houve uma tendência à diminuição com uma mudança de 7% e 5% respectivamente. Os fenômenos associados a esse comportamento podem estar mais relacionados a diminuição das propriedades mecânicas do material pelo aquecimento da superfície quando aumentada a velocidade de corte e pela rápida deformação e saída dos cavacos da zona de corte.

Neste viés, o presente trabalho apresenta uma análise da variação da macro e microgeometria da ferramenta e da velocidade de corte nas componentes de força de usinagem no torneamento longitudinal externo de um compósito autolubrificante sinterizado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a produção dos compósitos via compactação de pós, os materiais que foram utilizados apresentaram como matéria-prima da matriz ferrosa o pó de ferro puro (Höganäs, AHC 100.29, $d_{50} = 100$ μm). O aumento da resistência da matriz foi realizado por meio da adição de elementos de liga, como o carbono e níquel. O nitreto de boro hexagonal (Momentive, AC6028, $d_{50} = 125$ μm) foi adicionado à liga, juntamente com o grafite (Nacional Grafite, Micrograph 99545HP, $d_{50} = 32$ μm), para promover a lubrificação a seco. Porém, se faz necessário o uso o silício (Osprey Sandvik, alloy Fe45Si, $d_{50}=10$ μm) como elemento de liga para a estabilização do ferro alfa e endurecimento da matriz. A liga foi fabricada com composição química conforme mostrada na Tab. 1. A liga apresentou o balanço de ferro, 0,8% em massa de carbono e 0,5% em massa de Fe4Si juntamente com 1% e 6,5% em volume de nitreto de boro hexagonal ($d_{50} = 125$ μm) e grafite ($d_{50} = 32$ μm), respectivamente.

Tabela 1. Pós utilizados para a fabricação do compósito autolubrificante.

Pó	Nome comercial	Fabricante	Tamanho [μm]
Ferro	AHC 100,29	Höganäs	100
h-BN	hBN-6028	Momentive	100-150
Grafita	Micrograf 99545 HP	Nacional Grafite	20-45
Níquel	INCO 123	INCO	22
Fe35Si	Alloy Fe45Si	Sandvik	10

Um misturador tipo Y foi usado para misturar os pós por 45 minutos, com rotação de 35 rpm. Depois da etapa de misturar, os pós foram prensados em prensa hidráulica de dupla ação. Os materiais foram produzidos por simples compactação (SC) de 600 MPa. A sinterização dos materiais foi realizada por meio de um forno tubular em uma atmosfera de 95% de argônio e 5% de hidrogênio com dois patamares de temperatura. No primeiro patamar foi empregada uma taxa de aquecimento de 5 °C/min durante 30 minutos, para uma temperatura de 550 °C. No segundo patamar a sinterização final foi isotérmica, em uma temperatura de 1125 °C durante 60 minutos, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min. A dureza média dos materiais foi de 123 HB. Já a tensão máxima de tração e tensão de escoamento foi de 205 MPa e 197 MPa, respectivamente.

Após o processo de sinterização, os corpos de prova foram submetidos ao processo de furação seguido de alargamento, a fim de produzir um furo longitudinal passante com encaixe de chaveta para posterior montagem do corpo de prova no sistema de fixação da máquina-ferramenta. O corpo de prova foi em formato de disco, com diâmetro de 65 mm e largura de 20 mm, com furo passante de 16 mm (qualidade H7) e rasgo de chaveta.

A microestrutura do material foi caracterizada por meio de análise metalográfica, utilizando microscópio óptico Leica modelo DM4000 M/DFC45. Conforme a Fig. 1, foi possível observar as diferentes fases presentes no compósito, como: ferrita, ao redor dos poros, e perlita; além de fases ricas em níquel e cementita, as quais tornam o material heterogêneo e descontínuo.

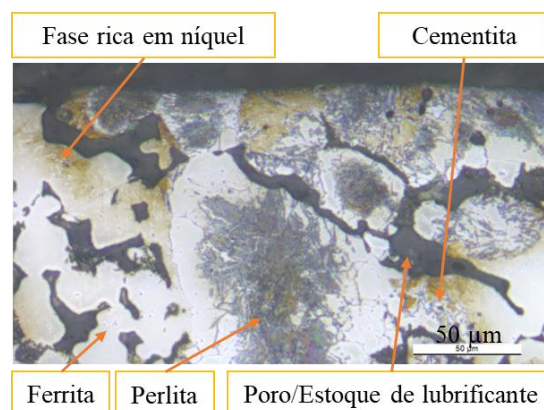


Figura 1. Microestrutura do composto autolubrificante sinterizado.

2.1. Processo de torneamento

Os corpos de prova foram submetidos ao processo de torneamento longitudinal externo, que foram realizados em um torno CNC Heiligenstaedt, modelo Heynumat 10, com potência de acionamento do fuso de 70 kW e rotação máxima de 4500 rpm. O equipamento possui fechamento hidráulico de três castanhas com pressão de 45 bar e comando CNC Siemens 802D. Os materiais foram usinados com insertos de metal-duro da classe P20 de geometria triangular com três gumes, código TCMT 16T308-SM IC907, sem revestimento, e com raio de gume (ρ) de 5 μm e 50 μm . Os insertos foram fornecidos pela empresa ISCAR do Brasil, assim como o porta-ferramenta utilizado (código STGCL 2020K-16). As ferramentas foram utilizadas com ângulo de inclinação e de direção do gume de 0° e 91° , respectivamente, ângulo de incidência de 7° e raio de quina de 0,8 mm. Os ensaios foram realizados a seco, utilizando ângulos de saída (χ) de 6° e 30° , e variando a velocidade de corte (v_c) em 2 níveis: 350 e 850 m/min. A profundidade de corte (a_p) e o avanço (f) mantiveram-se constantes em 1,0 mm e 0,2 mm, respectivamente, (f) de 0,2 mm e profundidade de corte de 1,0 mm. Foram realizadas 2 réplicas de cada ensaio.

A medição das componentes da força de usinagem - força de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força passiva (F_p) - foi realizada durante todos os testes usando uma plataforma piezelétrica, fabricada pela empresa Kistler Instrument AG, modelo 9257 A, com auxílio de amplificadores, também da marca Kistler, modelo 5011 e 5006, conectado a uma placa de aquisição da National Instruments, modelo NI USB 6218. Os valores das componentes da força de usinagem foram utilizando uma taxa de aquisição de 1 kHz para as 3 componentes da força de usinagem.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores médios das componentes da força de usinagem com seus respectivos intervalos de confiança são apresentados na Fig. 2, para velocidade de corte de 350 m/min, e na Fig. 3, para velocidade de corte de 850 m/min.

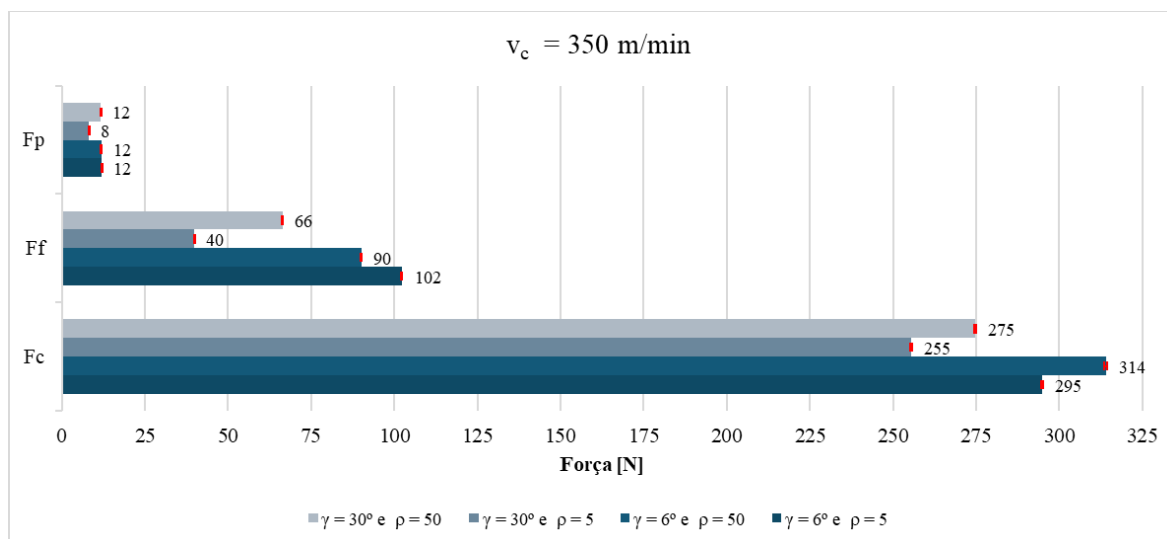


Figura 2. Valores médios das componentes da força de usinagem para velocidade de corte de 350 m/min.

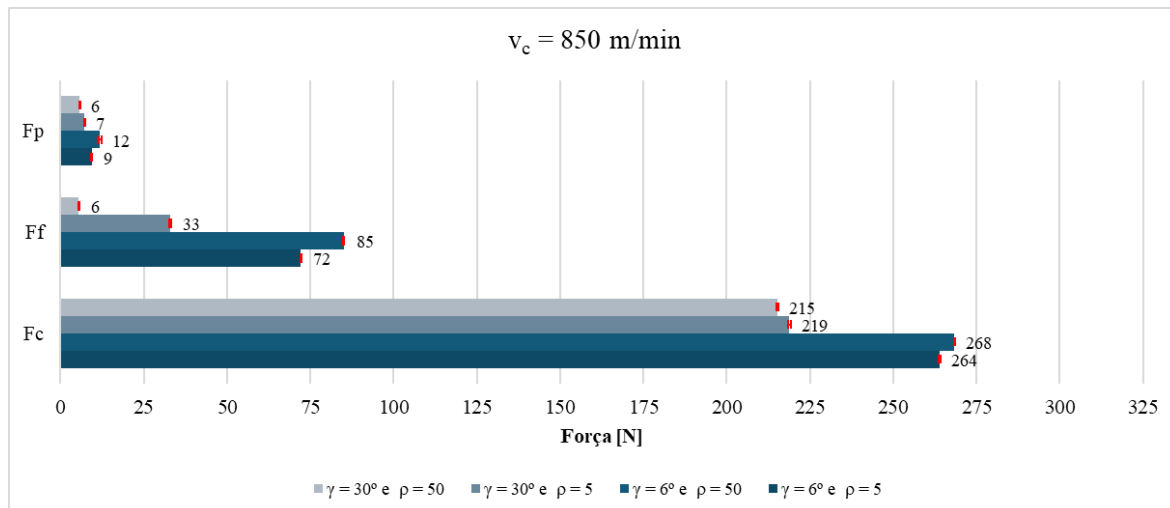


Figura 3. Valores médios das componentes da força de usinagem para velocidade de corte de 850 m/min.

Analisando a Fig. 2, é possível observar que o aumento do ângulo de saída, de 6° para 30° , proporcionou uma redução em todas as componentes da força de usinagem, independente do raio do gume da ferramenta, para velocidade de corte de 350 m/min. Para o raio de gume de 5 μm , o aumento do ângulo de saída gerou uma diminuição de cerca de 15% para a força de corte, 30% para a força de avanço e 35% para a força passiva. Para o raio de gume de 50 μm , essa diminuição foi de 15% para a força de corte, 25% para a força de avanço e 5% para a força passiva. A variação do ângulo de saída não apresentou influência significativa para as forças de corte, de avanço e passiva nos ensaios com raio do gume de 5 μm (p-valor ~ 0) e de 50 μm (p-valor igual a 0,08, 0,27 e 0,17, respectivamente). De acordo com Klocke (2011), Segebade *et al.* (2016) e Choi (2017), com o aumento do ângulo de saída há uma diminuição do fator de recalque, acarretando uma redução das componentes da força de usinagem.

Ao fixar o ângulo de saída em 30° , observa-se que o aumento do raio do gume, de 5 μm para 50 μm , implicou em um acréscimo de cerca de 10% para a força de corte, 65% para a força de avanço e 45% para a força passiva. Para os ensaios com ângulo de saída de 6° , o aumento do raio do gume proporcionou uma redução nas forças de avanço e passiva, de aproximadamente 10% e 5%, respectivamente. Entretanto, as forças de avanço e passiva não demonstraram diferença significativa entre si, apresentando p-valor de 0,95 e 0,50, respectivamente. Esse comportamento ocorre, pois, à medida que se aumenta o raio de gume, mantendo constante o avanço, há uma diminuição da espessura de usinagem. Como consequência, há uma alteração da interação entre o gume da ferramenta e a peça usinada, acarretando maior dificuldade na remoção de material. Segundo Wyen e Wegener (2010), o raio de gume possui uma relação direta com o coeficiente de atrito, ou seja, maiores valores de raio de gume geram maiores valores de coeficiente de atrito, e com isso, ocorre o aumento das componentes da força de usinagem.

Por meio da Fig. 3 é possível observar que o aumento do ângulo de saída, de 6° para 30° , para os ensaios com velocidade de corte de 850 m/min, proporcionou uma redução em todas as componentes da força de usinagem. Para os ensaios com raio de gume de 5 μm , o aumento do ângulo de saída propiciou uma diminuição de aproximadamente 15% para a força de corte, 55% para a força de avanço e 25% para a força passiva. Apenas a força de corte não apresentou diferença significativa com a variação do ângulo de saída (p-valor igual a 0,07). Para os ensaios com raio de gume de 50 μm , essa redução foi de 20% para a força de corte, 95% para a força de avanço e 50% para a força passiva, apresentando influência significativa da variação do ângulo de saída nas componentes da força de usinagem, em todas as condições testadas (p-valor $< 0,05$).

Com o aumento do raio do gume de 5 μm para 50 μm , observa-se um acréscimo no valor de todas as componentes da força de usinagem, para os ensaios com ângulo de saída de 6° . Contudo, para os ensaios com ângulo de saída de 30° , nota-se um comportamento oposto ao descrito, em que o aumento do raio do gume proporcionou uma redução em todas as componentes da força de usinagem. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que a utilização de um maior ângulo de saída, mesmo variando o raio do gume, proporciona deformações plásticas mais suaves, reduzindo assim as componentes da força de usinagem. Ademais, ao realizar a análise estatística dos dados, tem-se que a variação do raio do gume não apresentou influência significativa em nenhuma das componentes da força de usinagem. Para todos as combinações testadas, o p-valor resultou em valores maiores que 0,05.

Analisando os valores médios das componentes da força de usinagem para as velocidades de corte de 350 m/min (Fig. 2) e 850 m/min (Fig. 3), é possível observar que o aumento da velocidade de corte proporcionou uma redução nos valores das componentes da força de usinagem, para todas as geometrias de ferramenta de corte testadas. Por meio de análise estatística, pode-se concluir que a velocidade de corte influenciou significativamente no comportamento das componentes da força de usinagem (p-valor $< 0,05$ em todas as condições e interações), para um nível de confiança de 95%. De acordo com Klocke (2011), a velocidade de corte influencia diretamente na temperatura da região de corte. O aumento da velocidade de corte resulta em uma elevação da temperatura na zona de corte do material, e, por sua vez,

provoca a perda de resistência mecânica. Esse mecanismo facilita o corte do material e, consequentemente, reduz as componentes da força de usinagem. Além disso, dois tipos de fenômenos também podem contribuir para a diminuição da força de corte com o aumento da velocidade de corte. Segundo Wang *et al.* (2020), o aumento da velocidade de corte leva a um aumento da temperatura na zona de corte, diminuindo a resistência mecânica do material, e podendo proporcionar caldeamento do material cortado na interface cavaco-ferramenta. Esse efeito é capaz de gerar um filme que reduz o coeficiente de atrito devido à maior facilidade de escoamento pela face da ferramenta, o que contribui para uma maior redução da força de corte.

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados no presente trabalho, foi possível observar os efeitos do aumento da velocidade de corte e das alterações da geometria da ferramenta de corte no comportamento das componentes da força de usinagem em materiais compósitos autolubrificantes sinterizados.

A variação da velocidade de corte influenciou diretamente nas forças de corte, de avanço e passiva, para todas as condições de teste. Quando aumentada a velocidade de corte de 350 para 850 m/min as componentes da força de usinagem diminuíram em uma média de 25%. Com o aumento da velocidade de corte há um aumento da temperatura na zona de corte, ocorrendo a redução das propriedades mecânicas do material e assim, maior facilidade para o gume da ferramenta penetrar no material e realizar o corte.

Em relação à geometria da ferramenta de corte, observa-se que tanto a variação do ângulo de saída como a variação do raio do gume, apresentaram influência no comportamento e valores das componentes da força de usinagem. Com o aumento do valor do ângulo de saída, observou-se uma diminuição nas componentes da força de usinagem. Esse comportamento pode ser associado a melhora na formação do cavaco devido à diminuição do fator de recalque. Por outro lado, a variação do raio do gume proporcionou um aumento nas componentes da força de usinagem. Esse resultado é justificado pela maior dificuldade na remoção de material para valores mais elevados de raio de gume, acarretando maiores deformações no material usinado.

5. REFERÊNCIAS

- Binder, C., 2009, “Desenvolvimento de novos tipos de aços sinterizados autolubrificantes a seco com elevada resistência mecânica aliada a baixo coeficiente de atrito via moldagem de pós por injeção”, Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Choi, Y., 2017, “Influence of Rake Angle on Surface Integrity and Fatigue Performance of Machined Surfaces”, *International Journal of Fatigue*, Vol. 97, pp.81-88.
- Dorneles, C.F., Díaz, S.B., Ebersbach, F.G., Schroeter, R.B., 2023, “Influence of cutting speed on machining force and chip morphology in turning self-lubricating composites sinterized”, *ABCM Series on Mechanical Sciences and Engineering. COBEF 2023*. Vol.1, pp. 210-217.
- Ebersbach, F. G, Builes, S. D, Dorneles, C. F, Schroeter, R. B, Binder, C, Klein, A. N, De Mello, J. D. B, 2020, “Effect of cutting parameters in machining force, surface texture and chips morphology obtained in turning of sintered self-lubricating composites”, *Materials Research*, Vol. 23, pp 1–10.
- Erdemir, A., 2000, *Solid lubricants and self-lubricating films. Modern Tribology Handbook: Principles of Tribology*, Vol 1 pp. 787–825
- Hammes, G., 2011, “Aços sinterizados autolubrificantes a seco com elevada resistência mecânica associada a baixo coeficiente de atrito”, Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina.
- He, Y, Zhang, J, Qi, Y.; Liu, H.; Memon, A. R, Zhao, W, 2017, “Numerical study of microstructural effects on chip formation in high-speed cutting of ductile iron with discrete element method”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 249, pp 291–301, 2017.
- Grzesik, W., 2016, “Prediction of the functional performance of machined components based on surface topography: state of the art”, *Journal of Materials Eng Perform*, Vol. 25.
- Gwidon W. Stachowiak, A. W. B, 2006, *Engineering Tribology*, Elsevier.
- Holmberg, K.; Erdemir, A, 2019, “The impact of tribology on energy use and CO2 emission globally and in combustion engine and electric cars”, *Tribology International*, Vol. 135, pp. 389–396
- Klocke, F, 2011, *Manufacturing Processes 1*, Springer Berlin Heidelberg.
- Luo, J.; Zhou, X. 2020, “Future industry nearly getting rid of wear and frictional energy consumption”, *Superlubricative engineering, Friction*, Vol. 8, pp 643–665.
- M’saoubi, R., Czotscher, T., Andersson, O. e Meyerb, D., 2014. “Machinability of powder metallurgy steels using PcBN inserts”, *Procedia CIRP*, Vol. 14, pp. 83-86.
- Molnar, T. G., Berezvai, S. Kiss, A.K., Bachrathy, D., Stepan, G., 2019, “Experimental investigation of dynamic chip formation in orthogonal cutting”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 145, pp 103429.
- Nieslony, P. e Kiszka, P., 2012, “An investigation of surface texture after turning PM armco iron”, *Procedia CIRP*. Vol.1, pp. 671.

- Šalak, A., Vasiko, K., Selecka, M. e Danninger, H., 2006, “New short time face turning method for testing the machinability of PM steels”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 176, pp. 62-29.
- Segebade, E., Zanger, F. e Schulze, V., 2016, “Influence of Different Asymmetrical Cutting Edge Microgeometries on Surface Integrity”, *Procedia CIRP*, Vol. 45, pp. 11-14.
- Wang, B.; Liu, Z.; Cai, Y.; Luo, X.; Ma, H.; Song, Q.; Xiong, Z 2020, “Advancements in material removal mechanism and surface integrity of high-speed metal cutting: A review”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 166, pp. 103744

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em especial ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC); ao Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), da UFSC; ao Laboratório de Materiais (LABMAT), da UFSC. Os autores também gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à FUMDES/UNIEDU, bem como às empresas Embraco e Iscar do Brasil pelo financiamento desta pesquisa.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O(s) autor(es) é (são) os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.