

INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE NA FORÇA DE USINAGEM E MORFOLOGIA DO CAVACO NO TORNEAMENTO DE COMPOSTOS AUTOLUBRIFICANTES SINTERIZADOS

Caroline Francisco Dorneles

Sara Diaz Builes

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.
carol.fdorneles@gmail.com; saradbuiles@gmail.com

Felipe Gustavo Ebersbach

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.
felipe.ebersbach@gmail.com

Rolf Bertrand Schroeter

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.
rolf.schroeter@ufsc.br

Resumo: Atualmente, a melhora na eficiência energética vem sendo buscada para máquinas e equipamentos, sendo uma preocupação constante nos setores industriais. Neste contexto, os compostos 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. Desta forma, o presente trabalho apresenta uma análise sobre o efeito da variação da velocidade de corte nas componentes de força de usinagem e na morfologia do cavaco no torneamento longitudinal externo de um composto 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. Foram adotadas 6 velocidades de corte (v_c), iniciando em 350 m/min e finalizando em 850 m/min, com um incremento de 100 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 utilizando insertos de metal-duro, classe P20, de formato triangular com três gumes em uma única face. Durante os ensaios de usinagem, foram coletados dados da força de usinagem e amostras de cavaco. Como resultados, foi possível observar uma diminuição nas componentes da força de usinagem com o aumento da velocidade de corte. Ademais, ao analisar a morfologia do cavaco, observou-se a formação de cavacos em forma de vírgula. À medida que ocorre o aumento da velocidade de corte, os cavacos tendem a apresentar uma redução em seu comprimento, modificando sua forma.

Palavras-chave: composto autolubrificante sinterizado; força de usinagem; morfologia do cavaco.

1. INTRODUÇÃO

Dentro do contexto atual de sustentabilidade, a eficiência energética se tornou um dos temas de pesquisa mais importantes. Trabalhos recentes (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 com o intuito de melhorar o desempenho tribológico das superfícies, principalmente que atuem na redução do coeficiente de atrito, ganham cada vez mais importância nesse cenário.

Segundo Gwidon e Stachowiak (2006), os compostos 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.

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. Dentro deste contexto, o processo de torneamento torna-se uma excelente alternativa devido a sua ampla aplicação na indústria.

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 e na morfologia dos cavacos gerados no torneamento de compósitos autolubrificantes sinterizados. Os testes 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). Os autores observaram que independentemente da rota de fabricação dos materiais, para ambas as profundidades de corte e avanço testadas, o aumento na velocidade de corte resultou em uma redução nos valores da força de corte em cerca de 10%. O mesmo comportamento foi observado para a força passiva, apresentando uma redução de aproximadamente 25%. Além disso, o tipo de cavaco obtido foi segmentado e a relação de espessura de cavaco foi influenciada pela variação dos parâmetros de corte e da rota de fabricação dos materiais.

Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo sobre o efeito da variação da velocidade de corte nas componentes de força de usinagem e na morfologia do cavaco 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
Fe45Si	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 serão 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.

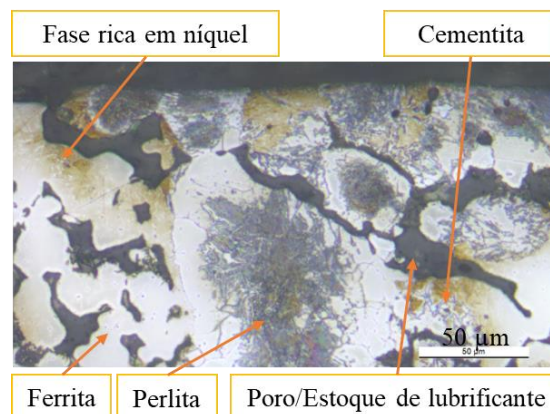


Figura 1. Microestrutura do compósito autolubrificante sinterizado.

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 47 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° , raio de quina de 0,8 mm e ângulo de saída de 18° . Os ensaios foram realizados a seco, variando a velocidade de corte (v_c) em 6 níveis: 350, 450, 550, 650, 750 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, força de avanço e força passiva) 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 determinados pela diferença entre a média dos sinais obtidos durante o corte e a média dos sinais obtidos em vazio, sendo adotada a medição de força com valores relativos. Além disso, foi utilizada uma taxa de aquisição de 1 kHz para as 3 componentes da força de usinagem.

Para os ensaios com velocidade de corte de 350, 650 e 850 m/min, foram coletadas amostras do cavaco gerado na usinagem. A análise morfológica do cavaco foi realizada por meio de imagens obtidas por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), marca Tescan, modelo VEGA3. O comprimento dos cavacos foi mensurado utilizando o *software* ImageJ.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Componentes da força de usinagem

Os valores médios das componentes da força de usinagem com seus respectivos intervalos de confiança são apresentados na Fig. 2. É possível observar que o aumento da velocidade de corte proporcionou uma redução nos valores das componentes da força de usinagem, para as velocidades de corte testadas. O aumento da velocidade de corte de 350 para 850 m/min acarretou uma diminuição de 7% para a força de avanço, 5% para a força passiva e de 9% para a força de corte. Contudo, na velocidade de corte de 650 m/min ocorreu um aumento em torno de 3% para força passiva e 10% para a força de avanço em relação à velocidade de 350 m/min. A variação da velocidade de corte não apresentou influência significativa na força de avanço e força passiva entre nenhuma das velocidades de corte (P-valor igual a 0,46 e 0,25, respetivamente). Para a força de corte, verificou-se diferença significativa entre as velocidades de corte de 350 e 850 m/min (p-valor = 0,001), reforçando o comportamento observado.

Como explicado por Denkena *et al.* (2007), o aumento das forças passiva e de avanço, para a velocidade de corte de 650 m/min pode ser explicado pelo fato dessa região apresentar um comportamento transitório devido aos fenômenos da zona de corte, como aumento de temperatura, rápida saída do cavaco e aumento das vibrações no processo.

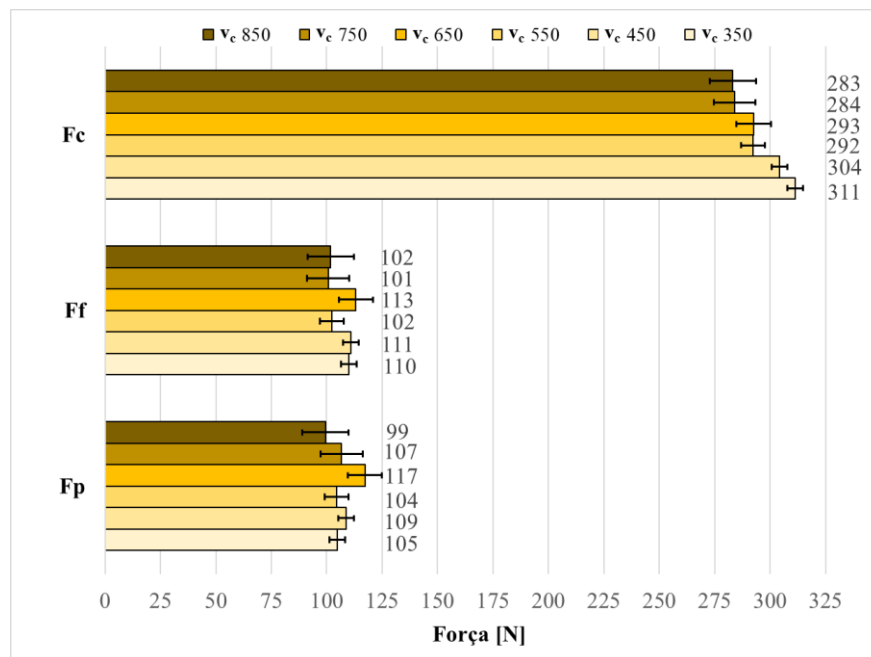


Figura 2. Comportamento das componentes da força de usinagem com a variação da velocidade corte.

Segundo Klocke (2011), a velocidade de corte é um parâmetro do processo que influencia diretamente na temperatura da região de corte. O aumento da velocidade de corte leva a um aumento da temperatura na zona de corte do material, e como consequência, ocorre a perda de resistência mecânica. Isto faz com que seja mais fácil realizar o corte do material, reduzindo assim as componentes da força de usinagem.

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), com o aumento da velocidade de corte ocorre um aumento da temperatura na zona de corte, que além de diminuir a resistência mecânica do material, pode proporcionar caldeamento do material cortado na interface cavaco-ferramenta. Esse fato é capaz de gerar um filme que reduz o coeficiente de atrito devido à maior facilidade de escoamento pela face da ferramenta, logo, poderia estar propiciando maior redução da força de corte. Contudo, há diferença quando utilizadas velocidades de corte ainda maiores, pois o fenômeno de caldeamento não é dominante devido à consideração da altíssima deformação e fragilização do cavaco além da rápida saída da zona de corte. Consequentemente, há uma diminuição da adesão do material da peça na interface cavaco ferramenta. Esse fenômeno também ajuda na redução do coeficiente de atrito, logo, produz uma redução das forças atuantes no processo.

3.1. Morfologia do cavaco

A Fig. 3 apresenta a morfologia dos cavacos para as condições de velocidade de corte (v_c) de 350, 650 e 850 m/min, respectivamente. Nota-se que com o aumento da velocidade de corte há uma tendência na redução do comprimento do cavaco. Quando mensurados os perímetros indicados na Fig. 3 com a linha pontilhada, constatou-se que não há diferença significativa entre os comprimentos (valor $P=0,212$), e foi obtido um valor médio de $3,6 \pm 1,7$ mm para a velocidade de corte de 350 m/min e de $2,7 \pm 0,9$ mm para a velocidade de corte de 850 m/min. Ademais, é possível observar que para a velocidade de corte de 850 m/min os cavacos apresentaram menor curvatura.

Segundo análises realizadas por Ebersbach *et al.* (2020), para o compósito autolubrificante sinterizado o cavaco cisalhado é característico do corte devido à heterogeneidade e descontinuidade do material. A diferença nas propriedades mecânicas das distintas fases facilita a fratura pela fase de menor resistência. Logo, apesar de se apresentar esse comportamento até na menor velocidade de corte testada, Molnar *et al.* (2019) explicam que a tendência ao aumento da frequência da fratura é também um causador do aumento da dispersão dos dados na medição das componentes da força de usinagem.

Uma das consequências do aumento da velocidade de corte é a mudança no tipo do cavaco. Segundo He *et al.* (2017), as altas taxas de deformação geradas pela velocidade de remoção fazem com que a frequência das bandas de cisalhamento do cavaco aumente e o material adote um comportamento mais frágil devido ao encruamento por deformação. Logo, no corte do compósito autolubrificante sinterizado, as altas taxas de deformação geradas pelo aumento da velocidade de corte poderiam ser uma das causas da diminuição do comprimento do cavaco além da mudança para um formato com menor curvatura. Outras razões que podem estar influenciando no aumento da fratura do cavaco podem estar relacionadas com a perda de estabilidade e aumento das vibrações do sistema máquina-ferramenta quando aumentada a velocidade de corte.

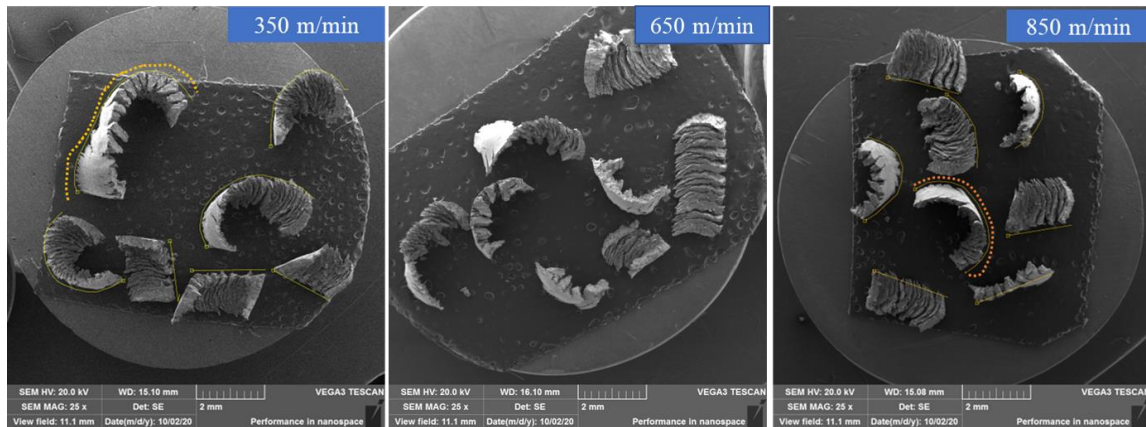


Figura 3. Morfologia dos cavacos para as velocidades de corte de 350, 650 e 850 m/min/, respectivamente.

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados no decorrer desse trabalho, foi possível observar os efeitos do aumento da velocidade de corte no comportamento das componentes da força de usinagem e na morfologia do cavaco de materiais compósitos autolubrificantes sinterizados.

A variação da velocidade de corte influenciou diretamente na força de corte quando aumentada a velocidade de corte de 350 para 850 m/min houve uma redução de 7%. Para as componentes de força passiva e força de avanço, não foi apresentada influência significativa, entretanto, observou-se uma tendência de diminuição dos valores das componentes com o aumento da velocidade de corte, de cerca de 9% e 5% respectivamente. 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 morfologia do cavaco, apesar de apresentar diminuição da curvatura e comprimento do cavaco, não foi verificada uma mudança drástica nem encontrada diferença estatisticamente representativa. Os fenômenos envolvidos na tendência de diminuição do comprimento do cavaco podem estar relacionados com o aumento das vibrações no sistema em decorrência do aumento da velocidade de corte.

5. 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.

6. REFERÊNCIAS

- Denkena, B.; Ben Amor, R.; De León-García, L.; Dege, J, 2007, “Material specific definition of the high speed cutting range”. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, Vol. 2, pp. 176–185.
- 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
- 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.
- 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

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

INFLUENCE OF CUTTING SPEED ON MACHINING FORCE AND CHIP MORPHOLOGY IN TURNING SELF-LUBRICATING COMPOSITES SINTERIZED

Caroline Francisco Dorneles

Sara Diaz Builes

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.
carol.fdorneles@gmail.com; saradbuiles@gmail.com

Felipe Gustavo Ebersbach

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.
felipe.ebersbach@gmail.com

Rolf Bertrand Schroeter

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.
rolf.schroeter@ufsc.br

Abstract. *Currently, the advance in energy efficiency has been sought for machines and equipment, being a constant concern in the industrial sectors. In this context, sintered self-lubricating composites are presented as a suitable alternative to traditional materials used in engineering, due to their satisfactory mechanical properties and low friction coefficient, which contribute to a reduction in energy consumption and an increase in sustainability. Thus, the present work presents an analysis of the effect of cutting speed variation on machining force components and chip morphology in external longitudinal turning of a sintered self-lubricating composite. The specimens were manufactured by powder metallurgy process and consist of a metallic matrix, composed of iron powder with the addition of alloying elements (Ni and Si), hBN and graphite particles added as solid lubricants. Six cutting speeds (v_c) were adopted, from 350 m/min to 850 m/min, using an increment of 100 m/min. The depth of cut and feed were set at 1.0 mm and 0.2 mm, respectively. Turning tests were performed using cemented carbide tools, class P20, with a triangular shape and three cutting edges of single face. During machining tests, machining force data and chip samples were collected. As a result, it was possible to observe a decrease in the machining force components with increasing cutting speed. Furthermore, when analyzing the chip morphology, the formation of longer arc chips was observed at low cutting speeds. As the cutting speed increases, the chips tend to show a reduction in their length, changing their shape.*

Keywords: *sintered self-lubricating composites; machining force; chip morphology.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.