

ANÁLISE DAS COMPONENTES DA FORÇA DE USINAGEM NO TORNEAMENTO DE COMPÓSITOS AUTOLUBRIFICANTES SINTERIZADOS

Felipe Gustavo Ebersbach

Rolf Bertrand Schroeter

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Laboratório de Precisão Mecânica (LMP), Departamento de Engenharia Mecânica. Rua Eng. Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, Trindade, CEP: 88040-900, Florianópolis - SC, Brasil.

felipe.ebersbach@gmail.com

rolf.schroeter@ufsc.br

Cristiano Binder

Aloísio Nelmo Klein

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Laboratório de Materiais (LabMat), Departamento de Engenharia Mecânica. Rua Eng. Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, Trindade, CEP: 88040-900, Florianópolis - SC, Brasil.

cristiano.binder@labmat.ufsc.br

a.n.klein@labmat.ufsc.br

Resumo. O objetivo desta pesquisa é analisar as componentes da força de usinagem durante o torneamento de um compósito sinterizado autolubrificante, fabricado via compactação de pós por duas rotas de fabricação. Os ensaios foram realizados a seco em um torno CNC utilizando ferramentas de metal-duro da classe P20 com revestimento em $Ti(C,N) + Al_2O_3 + TiN$. As componentes da força de usinagem foram monitoradas através de uma plataforma piezelétrica da Kistler Instrumente. Os parâmetros de corte variados foram a velocidade de corte ($v_c=100$ e 200 m/min), avanço ($f = 0,1$ e $0,2$ mm) e a profundidade de corte ($a_p = 0,5$ e 1 mm). Os materiais ensaiados são compósitos com matriz de Fe-C-Ni-Si contendo lubrificantes sólidos, os quais foram submetidos ao processo de compactação e posterior sinterização. Independentemente dos parâmetros de corte analisados, os compósitos sinterizados fabricados por dupla compactação (DC) acarretaram aumentos em torno de 15% nas componentes da força de usinagem, quando comparado aos compósitos sinterizados por simples compactação (SC). A variação dos parâmetros de corte influenciou significativamente as componentes da força de usinagem, independentemente da rota de fabricação dos materiais ensaiados.

Palavras chave: Usinagem. Força de usinagem. Parâmetros de corte. Compósitos autolubrificantes. Sinterização.

1. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos dos últimos anos e o aumento gradual das exigências no desempenho dos materiais de engenharia impulsionam, cada vez mais, o desenvolvimento de novos materiais com propriedades específicas, para as mais variadas aplicações. Mesmo com o avanço no desenvolvimento tecnológico, uma grande quantidade de energia mecânica produzida em todo o mundo continua sendo desperdiçada, principalmente pela deficiência na lubrificação, a qual é convertida em calor por atrito, interferindo drasticamente no desempenho de um sistema mecânico (Binder, *et al.*, 2010). Holmberg e Erdemir (2017) comentam que do consumo total de energia no mundo, aproximadamente 23% são originados de contatos tribológicos, onde 20% é usado para superar o atrito e 3% para recuperar peças e equipamentos desgastados ou que sofreram falhas devido ao desgaste. Portanto, pesquisas destinadas a melhorar o desempenho tribológico das superfícies, particularmente na redução do coeficiente de atrito, ganham cada vez mais relevância. Sistemas mecânicos que utilizam materiais com baixo coeficiente de atrito proporcionam uma diminuição no consumo de energia e ao mesmo tempo aumentam a durabilidade das peças envolvidas no sistema, o que reduz a taxa de descarte.

Os materiais autolubrificantes, que apresentam incorporados em seu volume as partículas de lubrificantes sólidos, podem ser fabricados por metalurgia do pó, através da compactação e sinterização (Hammes, *et al.*, 2014; Qin, *et al.*, 2018). A fabricação de materiais via metalurgia do pó proporciona porosidades em sua microestrutura, as quais são influenciadas por diversos fatores, como por exemplo a pressão de compactação (no caso de materiais fabricados por compactação de pós), tempo e temperatura de sinterização, bem como o tamanho e forma das partículas de pó utilizadas. Além disso, a metalurgia do pó apresenta como vantagem a capacidade de produção de peças com a geometria final (*near net shape*). Em casos onde existe a necessidade de um processo de acabamento após a sinterização, a usinagem pode ser utilizada para adequar as tolerâncias dimensionais e de forma, bem como obter a qualidade desejada da superfície (Smith e Allsop, 1991).

De acordo com König e Klocke (1997) e Klocke (2011), a usinabilidade dos materiais é normalmente avaliada através de quatro critérios, sendo eles o tempo de vida da ferramenta, a força de usinagem, a formação do cavaco e a qualidade da superfície usinada. Esses critérios servem para determinar diversos fatores, como por exemplo, o desgaste de ferramentas de corte, o dimensionamento de máquina-ferramenta e dispositivos de fixação das peças, o desenvolvimento de geometrias e materiais para ferramentas de corte, e a análise de consumo de energia, entre outros.

O desenvolvimento dos materiais que foram utilizados nesta pesquisa é recente e, portanto, o conhecimento relacionado à usinagem dos mesmos praticamente inexistentes. Com isso, o presente trabalho tem como objetivo verificar a influência dos parâmetros de corte (v_c , f e a_p) nas componentes da força de usinagem durante o torneamento longitudinal externo de uma liga de compósito autolubrificante. Os materiais foram fabricados via compactação de pós, por duas rotas de fabricação, a simples compactação (SC) e a dupla compactação (DC), e sinterização.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados na presente pesquisa apresentam como matéria-prima da matriz ferrosa o pó de ferro puro (Höganäs, AHC 100.29, $d_{50}=100\text{ }\mu\text{m}$). O aumento da resistência da matriz foi obtido por meio da adição de elementos de liga, como o carbono (Höganäs, Grafite UF4, $d_{50}=6\text{ }\mu\text{m}$) e níquel (Inco, INCO 123, $d_{50}=3,9\text{ }\mu\text{m}$). O nitreto de boro hexagonal (Momentum, AC6028, $d_{50}=125\text{ }\mu\text{m}$) foi adicionado à liga, juntamente com o grafite (Nacional de Grafite, Micrograph 99545HP, $d_{50}=32\text{ }\mu\text{m}$), para promover a lubrificação a seco. No entanto, se faz necessário o uso do silício (Osprey Sandvik, alloy Fe45Si, $d_{50}=10\text{ }\mu\text{m}$) como elemento de liga para a estabilização do ferro alfa e endurecimento da matriz. A liga de aço sinterizado foi fabricada com composição química conforme mostrada na Tab. 1. A liga apresenta o balanço de ferro, 0,8% em massa de carbono e 0,5% em massa de silício, juntamente com 1% e 6,5% em volume de nitreto de boro hexagonal e grafite grosso.

Tabela 1. Composição da liga utilizada nos ensaios.

	Fe	h-BN (%v)	Ni (%m)	C fino (%m)	C grosso (%v)	Si (%m)
Liga	Balanço	1	4	0,8	6,5	0,5

A mistura dos pós da liga foi realizada em um misturador tipo Y, durante 45 minutos, com rotação de 35 rpm. Os materiais foram compactados em uma prensa hidráulica automática, com matriz de duplo efeito, da marca Gabbrielli, modelo L4, com pressão de compactação máxima de 40 t. Os materiais foram produzidos por duas rotas de fabricação, sendo uma delas com simples compactação (SC) de 700 MPa, e a outra rota com dupla compactação (DC) de 500 e 700 MPa.

A sinterização dos materiais foi realizada por meio de um reator de plasma híbrido. Para todos os materiais, a sinterização final foi isotérmica, em uma temperatura de 1125 °C durante 1 h, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, em uma atmosfera de 95% de argônio e 5% de hidrogênio. Os materiais fabricados por dupla compactação foram pré-sinterizados, após serem pré-compactados a 500 MPa, a uma temperatura de 700 °C, durante 30 minutos. Logo após o resfriamento dos mesmos, foram compactados a 700 MPa e, a seguir, a sinterização final foi realizada. A dupla compactação teve como objetivo aumentar a densidade dos materiais fabricados, bem como obter um aumento na resistência mecânica da liga.

Independentemente da rota de fabricação, os materiais apresentam uma microestrutura com grande quantidade de ferrita com perlita fina, perlita grossa, poros provenientes do processo de metalurgia do pó e estoques de lubrificantes sólidos presentes nos materiais. Porém, regiões de cementita foram encontradas nos materiais fabricados DC. Percebeu-se também que os materiais fabricados por DC apresentam tamanho dos poros menores em relação aos materiais SC, em decorrência, segundo Hammes (2011), da maior densidade que esses materiais apresentam em relação aos materiais fabricados por SC.

Foi realizado um ensaio de dureza Brinell, com emprego de um durômetro Brinell, onde se obteve como resultado uma média para 6 medições de 145 e 170 HB para os materiais fabricados por SC e DC, respectivamente. Ensaio de resistência a tração foram realizados, de acordo com a MPIF (2012), utilizando como referência a norma ISO 82, em uma máquina universal de ensaios MTS 810. A média dos valores foi obtida através de 10 ensaios de tração para cada rota de fabricação dos materiais. O material SC apresentou uma resistência a tração máxima média de 205 MPa e tensão de escoamento média de 197 MPa, e o material DC apresentou uma resistência a tração máxima média de 402 MPa e tensão de escoamento média de 267 MPa.

A máquina-ferramenta utilizada para realizar os ensaios de torneamento é um torno CNC Heyligenstaedt, modelo Heynumat 10, com potência de acionamento do eixo-árvore de 70 kW e rotação máxima de 4500 rpm. A medição das componentes da força de usinagem foi realizada por meio de uma plataforma piezelétrica, fabricada pela empresa Kistler Instrumente AG, modelo 9273, com o auxílio de amplificadores de carga, também da empresa Kistler, 2 do modelo 5011 e 1 do modelo 5006. Durante a realização dos ensaios de usinagem, foi empregada uma taxa de aquisição de 10 kHz em cada uma das 3 componentes da força de usinagem. Após o processamento dos sinais e a gravação dos dados de força executados pelo *software* Labview 2016, o tratamento gráfico dos dados foi feito através do *software* Excel 2013. Em

seguida, por meio do Minitab 16, efetuou-se o teste ANOVA *One-Way* (nível de significância de 0,05), de acordo com Montgomery e Runger (2003), dos valores médios das três componentes da força de usinagem.

Os insertos utilizados nos ensaios foram do tipo *wiper*, de metal-duro (classe P20) com revestimento de $Ti(C,N) + Al_2O_3 + TiN$. A geometria das ferramentas foi mantida constante, com insertos WF ($\gamma = 13^\circ$), com $r_n = 48 \mu m$, $r_e = 0,8$ mm e $\chi = 91^\circ$. Com isso, foi analisada a variação dos parâmetros de corte (v_c , f e a_p) e suas influências sobre os esforços durante a usinagem. A Tabela 2 mostra os parâmetros de corte variados, para as duas rotas de fabricação, realizadas nos ensaios. Foram executados um total de 32 ensaios, sendo que para cada ensaio de usinagem foi realizada uma réplica.

Tabela 2. Parâmetros de corte utilizados nos ensaios.

v_c (m/min)	100 e 200
f (mm)	0,1 e 0,2
a_p (mm)	0,5 e 1

3. RESULTADOS OBTIDOS

Os valores médios da força de corte, com seus respectivos intervalos de confiança, tanto para o material SC e DC, são mostrados na Fig. 1. Percebe-se que, independentemente da rota de fabricação dos materiais, para ambas as profundidades de corte e avanço testados, o aumento da velocidade de corte acarretou uma redução nos valores da força de corte. O aumento da velocidade de corte de 100 para 200 m/min levou a uma diminuição na força de corte em torno de 10% e 8% para os materiais SC e DC (Fig. 1a), respectivamente. O mesmo comportamento foi observado para a força de avanço e passiva (Fig. 1b e 1c). O aumento da velocidade de corte acarretou na redução da força de avanço em aproximadamente 18% para os materiais SC e 15% para os materiais DC. A redução da força passiva com o aumento da velocidade de corte foi de aproximadamente 25%, para ambos os materiais (SC e DC). O aumento da velocidade de corte resulta no aumento da temperatura de corte na região do corte, acarretando assim uma redução nas componentes da força de usinagem devido à perda da resistência mecânica dos materiais quando submetidos a temperaturas mais altas (König e Klocke, 1997; Šalák, *et al.*, 2006; Yallese, *et al.*, 2009; Klocke, 2011; M'saoub, *et al.*, 2014).

Tanto para os materiais fabricados por simples e dupla compactação, a variação do avanço resultou no aumento da força de corte (Fig. 1a), independentemente da variação da velocidade e profundidade de corte. O aumento do avanço de 0,1 para 0,2 mm, levou a um acréscimo nos valores obtidos da força de corte em torno de 55% e 80% para os materiais SC e DC, respectivamente. Para a força de avanço e força passiva (Fig. 1b e 1c), o comportamento foi semelhante com a variação do avanço. O aumento do avanço acarretou acréscimo nos valores obtidos da força de avanço em torno de 25%, para os materiais fabricados por simples compactação, e 60% para os materiais fabricados por dupla compactação. Já a força passiva aumentou aproximadamente 50% para os materiais SC e 60% para os materiais DC, com o aumento do avanço de 0,1 para 0,2 mm. O aumento da espessura de corte ocorre com o aumento do avanço, resultando em maior quantidade de material removido, acarretando no aumento das componentes da força de usinagem (König e Klocke, 1997; Šalák, *et al.*, 2006; Klocke, 2011; Shoba, *et al.*, 2015; Rao e Allamraju, 2017).

Assim como o avanço, a variação da profundidade de corte também acarretou um aumento das componentes da força de usinagem. O incremento da profundidade de corte de 0,5 para 1 mm levou a um aumento na força de corte em torno de 75% e 95% para os materiais SC e DC (Fig. 1a), respectivamente. A força de avanço apresentou aumento de aproximadamente 100% para os materiais SC e 50% para os materiais DC (Fig. 1b). O aumento da força passiva situou-se em torno de 40% e 20% para os materiais SC e DC, respectivamente (Fig. 1c), com os aumentos praticados na profundidade de corte.

De acordo com König e Klocke (1997) e Klocke (2011), o aumento da profundidade de corte ocasiona um aumento da largura de corte, o que resulta no aumento das componentes da força de usinagem. O aumento da largura de corte resulta, teoricamente, no aumento proporcional das componentes da força de usinagem. Porém, com o aumento da profundidade de corte de 0,5 para 1 mm, não se verificou esse aumento proporcional da força de corte, força de avanço e força passiva (Fig. 1). Segundo Yallese, *et al.*, (2009), o aumento desproporcional das componentes da força de usinagem pode ocorrer, por exemplo, devido a deformações plásticas e à condutividade térmica do material usinado, bem como por vibrações oriundas do processo de usinagem. No entanto, como os materiais estudados na presente pesquisa apresentam heterogeneidade na sua estrutura, em decorrência dos poros provenientes do processo de metalurgia do pó e dos estoques de lubrificantes sólidos, tal fato pode ter influenciado no aumento desproporcional das componentes da força de usinagem com o aumento da profundidade de corte.

Nos ensaios realizados com profundidade de corte de 0,5 mm, os valores obtidos da força passiva apresentaram-se maiores do que os valores da força de avanço (Fig. 1), em torno de 30% e 20% para os materiais SC e DC, respectivamente. De acordo com Pramanik *et al.* (2006), em condições nas quais a profundidade de corte é inferior ao raio de quina (raio de ponta) da ferramenta, ocorre a redução do ângulo de direção do gume equivalente, o que provoca a redução da espessura média do cavaco. Com isso, as superfícies usinadas, na condição em que o $a_p < r_n$, têm tendência de apresentar aumentos na taxa de deformações plásticas e nas forças específicas em decorrência da diminuição da espessura média do cavaco (König e Klocke, 1997; Pramanik, *et al.*, 2006; Klocke, 2011).

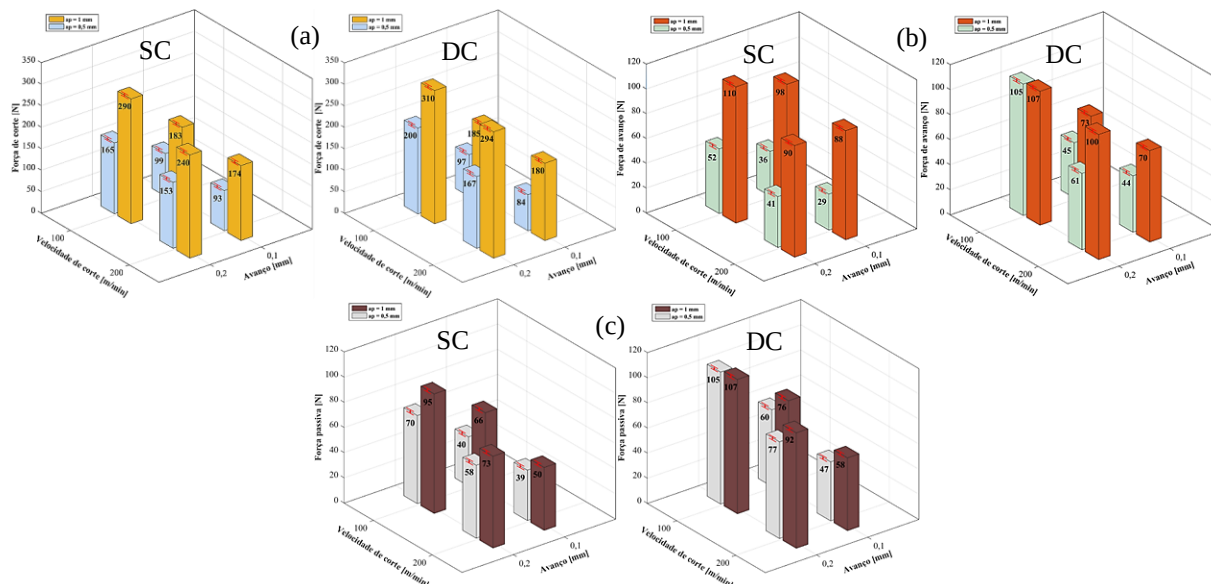


Figura 1. Valores médios da força de corte (a), força de avanço (b) e força passiva (c) em função da velocidade de corte, avanço e profundidade de corte para os materiais SC e DC.

O aumento da resistência mecânica, em aproximadamente 50%, dos materiais DC em relação aos materiais SC, resultou no aumento da força de corte, força de avanço e força passiva, em torno de 10%, 10% e 25%, respectivamente. O aumento da resistência mecânica de um material acarreta aumento das componentes de usinagem, em decorrência da maior resistência que o material a ser usinado apresenta para que a ferramenta de corte penetre no mesmo e forme cavacos (König e Klocke, 1997; Klocke, 2011). Por meio da análise de variância para a força de corte, avanço e passiva, a variação dos parâmetros de corte e rota de fabricação dos materiais apresentaram influencia significativa (P -valor $< 0,05$).

3. CONCLUSÕES

O aumento da velocidade de corte resultou redução das componentes da força de usinagem, independente da rota de fabricação dos materiais. Comportamento oposto foi verificado com o aumento do avanço e da profundidade de corte, os quais resultaram no aumento da força de corte, força de avanço e força passiva, tanto para o material SC e DC.

A rota de fabricação dos materiais influenciou nas componentes da força de usinagem. O aumento da resistência mecânica dos materiais DC em relação ao SC, em torno de 50%, proporcionou aumento em aproximadamente 10% para a força de corte e avanço e em torno de 25% para a força passiva.

4. 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 e Precisão (LMP); ao Laboratório de Prototipagem e Produção de Lotes Pilotos (LP³), ao Laboratório de Materiais (LABMAT), ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) e à Whirlpool-Embraco.

5. REFERÊNCIAS

- Binder, C., Hammes, G., Schroeder, R. M., Klein, A. N., De Mello, J. D. B., Binder, R. e Junior, W. R., 2010. "Fined Tuned" Steels Point the Way to Focused Future. *Metal Powder Report*, Vol. 65, p. 29-37.
- Hammes, G., 2011. *Aços Sinterizados Autolubrificantes a Seco com Elevada Resistência Mecânica Associada a Baixo Coeficiente de Atrito*. Tese de Doutorado em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Hammes, G., Schroeder, R., Binder, C.; Klein, A. N. e De Mello, J. D. B., 2014. Effect of Double Pressing/Double Sintering on the Sliding Wear of Self-Lubricating Sintered Composites. *Tribology International*, Vol. 70, p. 119 – 127.
- Holmberg, K. e Erdemir, A., 2017. Influence of Tribology on Global Energy Consumption, Costs and Emissions. *Friction*, Vol. 3, p. 263-284.
- Klocke, F., 2011. *Manufacturing Processes 1* - (Translated by Aaron Kuchle). Berlim: Springer.

- König, W. e Klocke, F., 1997. *Fertigungsverfahren 1. Drehen, Fräsen, Bohren*. 5 ed., Springer-Verlag GmbH, Berlin, Deutschland.
- M'saoubi, R., Czotscher, T., Andersson, O. e Meyer, D., 2014. Machinability of Powder Metallurgy Steels Using PcBN Inserts. *Procedia CIRP*, Vol. 14, p. 83 – 88.
- Metal Powder Industries Federation, 2012. *Standard Test Methods for Metal Powders and Powder Metallurgy Products*. p. 37-42.
- Montgomery, D. C. e Runger, G. C., 2003. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 2 ed. John Wiley and Sons.
- Pramanik, A., Zhang, L.C. e Arsecularatne, J. A., 2006. Prediction of Cutting Force in Machining of Metal Matrix Composites. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, p. 1795-1803.
- Qin, W., Fu, L., Zhu, J., Yang, W., Li, D. e Zhou, L., 2018. Tribological Properties of Self-Lubricating Ta-Cu Films. *Applied Surface Science*, Vol. 435, p.1105-1113.
- Rao, K. S. S. e Allamraju, K.V., 2017. Effect on Microhardness and Residual Stress in CNC Turning of Aluminium 7075 Alloy. *Materials Today*, Vol.4, p. 975-981.
- Śalak, 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, p. 62–69.
- Shoba, Ch., Ramanaiah, N. e NAGESWARA RAO, D., 2015. Effect of Reinforcement on the Cutting Forces while Machining Metal Matrix Composites – An Experimental Approach. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. Vol. 18, p. 658-663.
- Smith, G. T. e Allsop, M. J., 1991. Some Aspects in the Surface Integrity Associated with Turning of Powder Metallurgy Compacts. *Wear*, Vol. 151, p. 289–302.
- Yallese, M. A., Chaoui, K., Zeghib, N., Boulanouar, L. e RIGAL, J. F., 2009. Hard Machining of Hardened Bearing Steel Using Cubic Boron Nitride Tool. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, p. 1092-1104.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

ANALYSIS OF MACHINING FORCE COMPONENTS IN TURNING OF SINTERED SELF-LUBRICATING COMPOSITES

Felipe Gustavo Ebersbach

Rolf Bertrand Schroeter

Federal University of Santa Catarina (UFSC), Precision Mechanic Laboratory (LMP), Mechanical Engineering Department. Eng. Agrônomo Andrei Cristian Ferreira st, Trindade, Zip code 88040-900, Florianópolis - SC, Brazil.

felipe.ebersbach@gmail.com

rolf.schroeter@ufsc.br

Cristiano Binder

Aloísio Nelmo Klein

Federal University of Santa Catarina (UFSC), Materials Laboratory (LabMat), Mechanical Engineering Department. Eng. Agrônomo Andrei Cristian Ferreira st, Trindade, Zip code 88040-900, Florianópolis - SC, Brazil.

cristiano.binder@labmat.ufsc.br

a.n.klein@labmat.ufsc.br

Abstract. The objective of this research is to analyze of machining force components during the turning of a self-lubricating sintered composite, manufactured via pressing powders by two manufacturing routes. The tests were dry run on a CNC lathe using tools carbide P20 class with Ti (C, N) + Al₂O₃ + TiN coating. The components of the machining force were monitored through a piezoelectric platform of Kistler Instrumente. The cutting parameters varied were the cutting speed ($v_c = 100$ and 200 m/min), feed ($f = 0.1$ and 0.2 mm) and cutting depth ($a_p = 0.5$ and 1 mm). The materials tested are composites with matrix composition of Fe-Ni-C-Si containing solid lubricants, which were subjected to the pressing process and subsequent sintering. Regardless of the cutting parameters analyzed, the sintered composites produced by double pressing (DP) resulted in increases of around 15% in the machining force components, when compared to the sintered composites by single pressing (SP). The variation of the cutting parameters significantly influenced the machining force components, regardless of the manufacturing route of the materials tested.

Keywords: Machining, Machining force, Cutting parameters, Self-lubricating composites, Sintering.

RESPONSIBILITY NOTICE

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